



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“Identificación de viviendas afectadas por el alumbrado público (polución lumínica) en la ciudad de Cuenca”

Trabajo de titulación previa a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR:

Jorge Luis Sacta Pérez
C.I: 0104795406

DIRECTOR:

Ing. Rodrigo Efraín Sempértegui Álvarez
C.I: 0101868552

TUTORES:

Mst. Giovanni Santiago Pulla Galindo
C.I: 0101671097
Ing. Hugo Santiago Arévalo Pesántez
C.I: 0102216611

Cuenca - Ecuador
2018



RESUMEN

La contaminación lumínica es toda energía luminosa desaprovechada que puede causar efectos negativos sobre el medio ambiente, como por ejemplo, la emisión de flujo de luz en zonas o en direcciones que no deberían ser iluminadas. El presente trabajo tiene como objetivo principal cuantificar la cantidad de luz no necesaria producida por el alumbrado público y que está enfocada hacia las fachadas de las edificaciones existentes en el Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca, así como estimar la energía consumida para iluminar dichas áreas.

En los capítulos 1 y 2 se describen los conceptos relacionados con el alumbrado público y la polución lumínica. El capítulo 3 presenta una metodología para estimar la cantidad de luz, energía y flujo luminoso producida por las luminarias y que da hacia las fachadas de edificaciones, luego en el capítulo 4 se realizará un levantamiento de la información basada en los datos fotométricos de las luminarias existentes en el área de estudio, para en el capítulo 5 evaluarlos y realizar un análisis que permite cuantificar la cantidad de luz no necesaria y que da hacia las fachadas adyacentes. En el capítulo 6 se describen algunas propuestas de soluciones a los problemas de polución lumínica, y finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Palabras clave Alumbrado público, Polución lumínica, Curvas fotométricas, Sólido de distribución luminosa.



ABSTRACT

Light pollution is any unused light energy that can cause negative effects in the environment, such as the emission of light flow in areas or in directions that should not be illuminated. The main objective of this study is to quantify the amount of unnecessary light produced by public lighting that is focused on the facades of existing buildings in Cuenca's historic downtown, as well as estimate the energy consumed to illuminate these areas.

Chapters 1 and 2 describe the concepts related to public lighting and light pollution. Chapter 3 presents a methodology to estimate the amount of light, energy and luminous flux produced by the luminaires next to the facades of buildings, then chapter 4 shows information based on the photometric data of the luminaries existing in the study area. Chapter 5 evaluates and performs an analysis to quantify the amount of light not necessary and that illuminates the adjacent facades. Chapter 6 describes some solutions for the problems of light pollution. Finally, conclusions and recommendations are presented.

KEYWORDS Public lighting, Light pollution, Photometric curves, Light distribution solid.



ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1.....	19
1. GENERALIDADES E INTRODUCCIÓN.....	19
1.1 ANTECEDENTES.....	19
1.2 JUSTIFICACIÓN	20
1.3 OBJETIVOS	20
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	20
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4 ALCANCE	21
1.5 METODOLOGÍA.....	21
1.6 PROBLEMAS NO RESUELTOS.....	21
1.7 HIPÓTESIS	21
1.8 VARIABLES.....	22
1.9 MÉTODOS UTILIZADOS.....	22
CAPÍTULO 2.....	23
2. ALUMBRADO PÚBLICO Y POLUCIÓN LUMÍNICA.....	23
2.1 INTRODUCCIÓN.....	23
2.2 CONCEPTOS GENERALES SOBRE LUMINOTÉCNIA	23
2.2.1 MAGNITUDES LUMINOSAS	23
2.2.1.1 FLUJO LUMINOSO.....	23
2.2.1.2 EFICIENCIA LUMINOSA	24
2.2.1.3 CANTIDAD DE LUZ.....	25
2.2.1.4 INTENSIDAD LUMINOSA.....	25
2.2.1.5 ILUMINANCIA.....	26
2.2.1.6 LUMINANCIA.....	27
2.3 FUNDAMENTOS TÉCNICOS DEL ALUMBRADO PÚBLICO	28
2.3.1 DEFINICIONES	28
2.3.1.1 ALCANCE.....	28
2.3.1.2 ALTURA DE MONTAJE (EN UNA VIA).....	28
2.3.1.3 CENTRO ÓPTICO DE LA LÁMPARA.....	28
2.3.1.4 COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN (CU Ó K)	29
2.3.1.5 CURVA ISOLUX	29
2.3.1.6 DESLUMBRAMIENTO.....	29
2.3.1.7 DIAGRAMA POLAR.....	29
2.3.1.8 EFECTO ESTROBOSCÓPICO.....	29

2.3.1.9 EFICIENCIA DE UNA LUMINARIA.	30
2.3.1.10 FLUJO HEMISFÉRICO SUPERIOR (FHS).	30
2.3.1.11 FOTOMETRÍA	30
2.3.1.12 MATRIZ DE INTENSIDADES.	30
2.3.2 LUMINARIAS	30
2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS LUMINARIAS SEGÚN SU SIMETRÍA DE DISTRIBUCIÓN	31
2.3.3.1 LUMINARIAS DE DISTRIBUCIÓN SIMÉTRICA.....	31
2.3.3.2 LUMINARIAS DE DISTRIBUCIÓN ASIMETRICA	32
2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LAS LUMINARIAS EMPLEADAS EN ALUMBRADO PÚBLICO	33
2.3.4.1 LUMINARIAS CUT-OFF O DE HAZ RECORTADO	33
2.3.4.2 LUMINARIAS SEMI CUT-OFF O DE HAZ SEMI RECORTADO	34
2.3.4.3 LUMINARIAS NON CUT-OFF O DE HAZ NO RECORTADO	35
2.3.5 REQUISITOS NECESARIOS PARA UN SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO.....	36
2.3.5.1 VISIBILIDAD	36
2.3.5.2 CANTIDAD Y CALIDAD DE LUZ	37
2.3.5.3 SEGURIDAD	37
2.3.5.4 CONFIABILIDAD DE PERCEPCIÓN	37
2.3.5.5 COMODIDAD VISUAL	38
2.4 POLUCIÓN LUMÍNICA.....	38
2.4.1 DEFINICIÓN	38
2.4.2 CAUSAS Y EFECTOS DE POLUCIÓN LUMÍNICA [12] [13] [14]	39
2.4.3 EMISIONES DE LUZ ARTIFICIAL QUE PRODUCEN POLUCIÓN LUMÍNICA.....	42
2.4.3.1 EMISIÓN DIRECTA.....	42
2.4.3.2 EMISIÓN INDIRECTA.....	42
2.4.3.3 EMISIÓN POR REFRACCIÓN.....	43
2.4.4 IMPACTO DE LAS LÁMPARAS COMO CONTAMINANTE LUMÍNICO.....	43
2.4.5 CONTAMINACIÓN LUMÍNICA SEGÚN NORMA ECUATORIANA RTE INEN 069 “ALUMBRADO PÚBLICO”.....	46
CAPÍTULO 3.....	48
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	48
3.1 ANTECEDENTES.....	48
3.2 ÁREA DE ESTUDIO	48
3.3 PROPUESTA PARA LA CARACTERIZACIÓN.....	49
3.3.1 TÉRMINOS RELACIONADOS CON LA LUMINARIA.....	50

3.3.1.1 DISPOSICIÓN DE MEDICIÓN (DE UNA LUMINARIA)	50
3.3.1.2 CENTRO DE LUZ (DE UNA FUENTE)	50
3.3.1.3 CENTRO FOTOMÉTRICO.....	50
3.3.1.4 EJE PRIMARIO (DE LA LUMINARIA)	50
3.3.1.5 EJE SECUNDARIO (DE LA LUMINARIA)	50
3.3.2 TÉRMINOS RELACIONADOS CON LAS CANTIDADES MEDIDAS EN LAS LUMINARIAS	50
3.3.2.1 DATOS DE LUMINARIA POR 1000 LM (DEL FLUJO DE LÁMPARA)	50
3.3.2.2 DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD LUMINOSA (DE UNA LUMINARIA) ...	51
3.3.2.3 FACTOR DE SALIDA LUMINOSA (DE UNA LUMINARIA) LOR	51
3.3.2.4 FRACCIÓN DE FLUJO HACIA ARRIBA UFF	51
3.3.2.5 FACTOR DE CONVERSIÓN DE SERVICIO	51
3.3.3 TÉRMINOS ASOCIADOS A LAS MEDICIONES.....	51
3.3.3.1 MEDICIÓN ABSOLUTA	51
3.3.3.2 MEDICIÓN RELATIVA	52
3.3.3.3 MEDICIÓN DE LÁMPARA DESNUDA	52
3.3.4 TÉRMINOS RELACIONADOS A LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA.....	52
3.3.4.1 FOTÓMETRO	52
3.3.4.2 GONIOFOTÓMETRO	52
3.3.5 SISTEMAS DE COORDENADAS PARA LA FOTOMETRÍA DE LA LUMINARIA [19]	52
3.3.5.1 SISTEMAS DE PLANOS DE MEDICIÓN	53
3.3.5.1.1 PLANOS-A	53
3.3.5.1.2 PLANOS-B	54
3.3.5.1.3 PLANOS-C	55
3.3.6 CONVENCIONES Y PROCEDIMIENTOS [20].....	56
3.3.6.1 CONVENCIONES MATEMÁTICAS PARA LAS DISTANCIAS MEDIDAS EN LAS CARRETERAS	56
3.3.6.2 CONVENCIONES MATEMÁTICAS PARA EJES DE LUMINARIAS.....	57
3.3.7 REQUISITOS PARA LOS DATOS FOTOMÉTRICOS [20].....	59
3.3.7.1 DATOS DE INTENSIDAD LUMINOSA DE LAS LUMINARIAS.....	59
3.3.7.2 INTERPOLACIÓN DE DATOS DE INTENSIDAD LUMINOSA	60
3.3.7.3 INTERPOLACIÓN LINEAL	61
3.3.7.4 INTERPOLACIÓN CUADRÁTICA.....	63
3.3.8 CÁLCULO DE $I(C, \gamma)$	65
3.3.8.1 CÁLCULO DE C: LUMINARIA NO GIRADA ALREDEDOR DE EJES FOTOMÉTRICOS.....	65



3.3.8.2 CÁLCULO DE γ : LUMINARIA NO GIRADA ALREDEDOR DE EJES FOTOMÉTRICOS.....	66
3.3.8.3 CÁLCULO DE C Y γ : LUMINARIA GIRADA ALREDEDOR DE EJES FOTOMÉTRICOS.....	66
3.3.9 MEDICIONES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA INTENSIDAD LUMINOSA.....	68
3.3.9.1 MEDICIÓN DE LUMINARIAS	68
3.3.9.1.1 MONTAJE.....	68
3.3.9.1.1.2 MEDICIÓN.....	69
3.3.9.1.1.3 MEDICIÓN DE POLARIZACIÓN	69
3.3.9.2 MONTAJE.....	69
3.3.9.2.1 MEDICIÓN.....	70
3.3.10 MEDICIONES DEL FLUJO LUMINOSO DE LUMINARIAS	71
3.3.10.1 MÉTODO DE INTEGRACIÓN DE INTENSIDAD	72
3.3.10.1.1 CALIBRACIÓN RELATIVA DEL GONIOFOTÓMETRO.....	72
3.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	73
3.4.1 DATOS DE DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD LUMINOSO	73
3.4.1.1 AJUSTE POLIMÓNIMO EN MATLAB	74
3.4.1.2 LÍNEAS DE TENDENCIAS POLINÓMICAS	75
3.4.1.2.1 LÍNEAS DE TENDENCIA POLINÓMICAS	75
3.5 VARIABLES DE ESTUDIO	75
CAPÍTULO 4.....	76
4. LEVANTAMIENTO DE DATOS DE POLUCIÓN LUMÍNICA	76
4.1 INTRODUCCIÓN.....	76
4.2 LUMINARIAS UTILIZADAS EN EL ALUMBRADO PÚBLICO DEL CENTRO HISTORICO DE CUENCA	76
4.2.1 INTI (General Public Lighting) 250 W	76
4.2.1.1 CARACTERÍSTICAS	77
4.2.1.1.1 CUERPO	77
4.2.1.1.2 REFLECTOR	77
4.2.1.1.3 REFRACTOR	77
4.2.1.1.4 HERMETICIDAD	77
4.2.2 LUMINARIAS ONYX 2	78
4.2.2.1 FOTOMETRÍA	78
4.2.2.1.1 DISTRIBUCIÓN FOTOMÉTRICA CONTROLADA.....	78
4.2.2.1.2 PROTECTOR DE VIDRIO	78
4.2.2.1.3 AJUSTE DE LA LÁMPARA.....	79

4.2.2.1.4 FOTOMETRÍA ÓPTIMA DE LARGA DURACIÓN	79
4.3 DISPOSICION DE LAS LUMINARIAS	79
4.3.1 DISPOSICIÓN UNILATERAL.....	80
4.4 ANCHO DE LAS VÍAS [21]	80
4.5 FLUJO HEMISFERIO SUPERIOR.....	81
4.6 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN	81
CAPÍTULO 5.....	82
5. ANÁLISIS DE DATOS RECOPIADOS.....	82
5.1 INTRODUCCIÓN.....	82
5.2 CONVENCIONES MATEMÁTICAS PARA LOS CÁLCULOS	82
5.2.1 CÁLCULO DE C	83
5.2.2 CÁLCULO DE γ	83
5.3 CÁLCULO DE INTENSIDAD LUMINOSA	84
5.3.1 AJUSTE POLINÓMICO MEDIANTE MATLAB	84
5.3.1.1 LUMINARIA INTI (General Public Lighting) 250W.....	84
5.3.1.1.1 PLANO C = 67.5°	84
5.3.1.1.2 PLANO C = 90°	86
5.3.1.1.3 PLANO C = 112.5°	87
5.3.1.2 LUMINARIA ONYX 2	89
5.3.1.2.1 PLANO C = 60°	89
5.3.1.2.2 PLANO C = 70°	90
5.3.1.2.3 PLANO C = 80°	92
5.3.1.2.4 PLANO C = 90°	93
5.3.1.2.5 PLANO C = 100°	95
5.3.1.2.6 PLANO C = 110°	96
5.3.1.2.7 PLANO C = 120°	97
5.4 CÁLCULO DE FLUJO LUMINOSO.....	99
5.4.1 LUMINARIA INTI (General Public Lighting) 250W.....	99
5.4.2 LUMINARIA ONYX 2	99
5.5 CÁLCULO DE CANTIDAD DE LUZ	100
5.5.1 LUMINARIA INTI (General Public Lighting) 250W.....	100
5.5.2 LUMINARIA ONYX 2	100
5.6 TABLA DE RESULTADOS	100
ONYX 2.....	100
5.7 CÁLCULO DE EMOSIÓN DE CO ₂	101
CAPÍTULO 6.....	103



6.	PROPUESTA DE SOLUCIONES A PROBLEMAS DE POLUCIÓN	103
6.1	INTRODUCCIÓN.....	103
6.2	CÓMO MINIMIZAR EL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA ..	103
6.3	ORIENTACIÓN CORRECTA DE LAS LUMINARIAS	104
6.4	SISTEMA DE ILUMINACIÓN LED	105
CAPÍTULO 7.....		106
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
7.1	CONCLUSIONES	106
7.2	RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA.....		108
ANEXOS.....		110
ANEXO 3.1. Reportes fotométrico		110
INTI 250 W		110
ONYX 2		112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Representación de flujo luminoso.....	24
Figura 2. 2 Ángulo sólido.....	26
Figura 2. 3 Luminancia de una superficie.....	27
Figura 2. 4 Curva fotométrica de una luminaria con distribución simétrica.	31
Figura 2. 5 Iluminación de exteriores producida por una luminaria con distribución simétrica.	32
Figura 2. 6 Curva fotométrica de una luminaria con distribución asimétrica.	32
Figura 2. 7 Iluminación de exteriores producida por una lámpara con distribución asimétrica.	33
Figura 2. 8 Luminaria simétrica cut-off.	34
Figura 2. 9 Curvas fotométricas de luminaria simétrica cut-off.	34
Figura 2. 10 Luminaria simétrica semi cut-off.	35
Figura 2. 11 Curvas fotométricas de luminaria simétrica semi cut-off.....	35
Figura 2. 12 Luminaria asimétrica no cut-off.	36
Figura 2. 13 Curvas fotométricas de luminaria simétrica non cut-off.	36
Figura 2. 14 Espectro electromagnético.....	43
Figura 2. 15 Espectro de lámparas.	44
Figura 3. 1 Mapa del centro histórico de la ciudad de Cuenca.	49
Figura 3. 2 Orientación de la luminaria para goniofotometría A, α	53
Figura 3. 3 Orientación de la luminaria para goniofotometría B, β	54
Figura 3. 4 Orientación de la luminaria para goniofotometría C, γ	55
Figura 3. 5 Sistema de coordenadas para ubicar la luminaria en un plano.....	57
Figura 3. 6 Ejes para girar la luminaria, sistema de coordenadas (x, y, z).....	58
Figura 3. 7 Inclinación durante la medición, inclinación en la aplicación, inclinación para el cálculo.....	58
Figura 3. 8 Sistema de coordenadas C, γ	59
Figura 3. 9 Requerimientos para interpolación lineal de intensidad luminosa.....	61
Figura 3. 10 Ángulos requeridos para la interpolación lineal de intensidad luminosa.	61
Figura 3. 11 Valores requeridos para interpolación cuadrática.	63
Figura 4. 1 Luminaria INTI.....	77
Figura 4. 2 Dimensiones y fijación de luminaria Onyx 2.	78
Figura 4. 3 (i) Lámpara en posición adelantada para una reducida anchura de la vía (L=0,8 h), (ii) Lámpara de posición alejada para una mayor anchura de la vía (L=1.5 h).	79
Figura 4. 4 Disposición unilateral de luminarias.	80
Figura 5. 1 Ajuste polinómico del plano C = 67.5°	85
Figura 5. 2 Ajuste polinómico del plano C = 90°	87
Figura 5. 3 Ajuste polinómico del plano C = 105°	88
Figura 5. 4 Ajuste polinómico del plano C = 60°	90
Figura 5. 5 Ajuste polinómico del plano C = 70°	91
Figura 5. 6 Ajuste polinómico del plano C = 80°	93
Figura 5. 7 Ajuste polinómico del plano C = 90°	94
Figura 5. 8 Ajuste polinómico del plano C = 100°	95
Figura 5. 9 Ajuste polinómico del plano C = 110°	97



Figura 5. 10	Ajuste polinómico del plano $C = 120^\circ$	98
Figura 6. 1	Ángulos de inclinación de las luminarias.	103
Figura 6. 2	Correcta orientación de la luminaria.	104
Figura 6. 3	Diseño tradicional de alumbrado público (i), vs Diseño optimizado (d). ..	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1	Flujo luminoso emitido por algunas lámparas.	24
Tabla 2. 2	Rendimiento luminoso de algunas lámparas.....	25
Tabla 2. 3	Luminancia máxima permitida.	28
Tabla 2. 4	Lámparas según su nivel contaminante.	44
Tabla 3. 1	Cálculo de C para x e y.....	66
Tabla 3. 2	Cálculo de C para x' e y'.	67
Tabla 3. 3	Cálculo de γ	68
Tabla 4. 1	Cantidad máxima permitida de emisión lumínica hacia los cielos nocturnos.	81
Tabla 5. 1	Resultados obtenidos.	100
Tabla 5. 2	Resultados obtenidos de las Emisiones de CO ₂	102

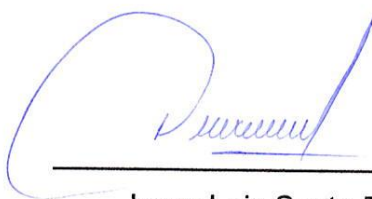


Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Jorge Luis Sacta Pérez, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "IDENTIFICACIÓN DE VIVIENDAS AFECTADAS POR EL ALUMBRADO PÚBLICO (POLUCIÓN LUMÍNICA) EN LA CIUDAD DE CUENCA", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que se realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 114 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, mayo de 2018



Jorge Luis Sacta Pérez

0104795406



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Jorge Luis Sacta Pérez, autor de la tesis “IDENTIFICACIÓN DE VIVIENDAS AFECTADAS POR EL ALUMBRADO PÚBLICO (POLUCIÓN LUMÍNICA) EN LA CIUDAD DE CUENCA”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, mayo de 2018

Jorge Luis Sacta Pérez

0104795406



Certifico que el trabajo de titulación “IDENTIFICACIÓN DE VIVIENDAS AFECTADAS POR EL ALUMBRADO PÚBLICO (POLUCIÓN LUMÍNICA) EN LA CIUDAD DE CUENCA” ha sido desarrollado por el señor: Jorge Luis Sacta Pérez con C.I: 0104795406.

Cuenca, mayo de 2018

Ing. Rodrigo Efraín Sempértegui Álvarez
DOCENTE DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



Los tutores de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, certifican que el trabajo de titulación “IDENTIFICACIÓN DE VIVIENDAS AFECTADAS POR EL ALUMBRADO PÚBLICO (POLUCIÓN LUMÍNICA) EN LA CIUDAD DE CUENCA” ha sido desarrollado por el señor: Jorge Luis Sacta Pérez con C.I: 0104795406.

Cuenca, mayo de 2018

Mst. Giovani Santiago Pulla Galindo.
JEFE DTO. DE ALUMBRADO PÚBLICO
TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing. Hugo Santiago Arévalo Pesántez.
SUPTE. DE ALUMBRADO PÚBLICO
TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



ESTA TESIS HA SIDO DESARROLLADA DENTRO DEL CONVENIO ENTRE
LA UNIVERSIDAD DE CUENCA Y LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL
CENTRO SUR C.A



AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto, a mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, por cada día confiar y creer en mí y mis expectativas. A la Universidad de Cuenca por su acogida, a mis profesores por brindarme sabiduría y conocimiento para mi formación como profesional; de manera especial al Ing. Rodrigo Sempértegui, por su apoyo y colaboración en la dirección de este trabajo de titulación.

A la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, por brindarme la confianza para la elaboración de este trabajo; a mis tutores, Mst. Santiago Pulla e Ing. Hugo Arévalo por el tiempo brindado y sus conocimientos compartidos.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo.

Jorge Luis



DEDICATORIA

A mis padres y hermanas que gracias a su apoyo he podido concluir mi carrera.
A la memoria de mi hermano y amigo Paul.

Jorge Luis

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES E INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Un sistema de alumbrado público debe proporcionar la cantidad de luz adecuada sobre determinadas áreas, permitiendo una circulación cómoda y segura tanto para vehículos como para peatones. Se denomina contaminación lumínica a toda energía luminosa desaprovechada que puede causar efectos negativos sobre el medio ambiente, como por ejemplo, la emisión de flujo de luz en zonas o direcciones que no deberían ser iluminadas, áreas naturales cercanas o al interior de edificaciones adyacentes, así como desperdicio energético [1].

El Concejo Municipal de Cuenca estableció el alumbrado público en la ciudad en el año de 1893 y desde entonces ha ido evolucionando desde el uso de candiles de petróleo en farolas, al uso de lámparas incandescentes que funcionaban con energía eléctrica, para luego utilizar luminarias fluorescentes de vapor de mercurio y, posteriormente, de vapor de sodio. La Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A., institución a cargo de la distribución eléctrica en Cuenca, ha iluminado la ciudad paulatinamente desde el año 1950 fecha de fundación, de la empresa. Inicialmente la cantidad de luminarias era reducida y se tenía menor porcentaje de pérdidas de energía pero, a medida que la empresa ha ido incrementando el número de luminarias, se genera mayores problemas de pérdidas de energía observadas en forma de polución lumínica, debido a que las fuentes de luz no iluminan exactamente el área deseada.

En el período 1992-1995 se sustituyeron, en el centro histórico de la ciudad, todas las luminarias de mercurio por luminarias de sodio de alta presión, y se mejoró el servicio de iluminación en este sector utilizando 1.200 luminarias en un área que abarcaba 120 manzanas. A partir de esa fecha se dejó de adquirir luminarias de mercurio y actualmente sólo se utiliza luminarias de sodio de alta presión para la iluminación de vías en toda la ciudad.

El sistema de iluminación actual produce contaminación lumínica, por lo que es propósito de este estudio evaluar la energía que no se destina a la iluminación pública y que finalmente ilumina fachadas de edificaciones en el centro histórico, sin que este sea el propósito inicial.

1.2 JUSTIFICACIÓN

A pesar que el alumbrado público es utilizado para iluminar las áreas de la ciudad, un mal diseño, o la ineficiencia de las luminarias, generan lo que se conoce como contaminación lumínica. No se tiene cuantificado que cantidad de iluminación y energía está mal utilizada por el alumbrado público e ilumina las fachadas de las edificaciones del centro histórico de la ciudad de Cuenca. Se pretende identificar las áreas innecesariamente iluminadas por el alumbrado público con la finalidad de buscar alternativas que tiendan a reducir este inconveniente, para lo cual hay que evaluar la cantidad de energía mal utilizada.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Cuantificar la cantidad de luz no necesaria que está enfocada a las fachadas de las edificaciones existentes en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, así como estimar la energía consumida para iluminar dichas áreas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener estimaciones de cantidad de luz que produce el alumbrado público sobre las fachadas de las edificaciones existentes en el centro histórico de la ciudad de Cuenca de manera innecesaria.
- Estimar la cantidad de energía y flujo luminoso no utilizado en el alumbrado público (fachadas indicadas en el párrafo anterior).
- Plantear posibles soluciones para evitar iluminar las fachadas de las edificaciones innecesariamente.

1.4 ALCANCE

Este estudio pretende cuantificar la energía mal utilizada y la cantidad de luz no utilizada en el alumbrado público que da hacia las fachadas de las edificaciones existentes dentro del centro histórico de la ciudad de Cuenca. El trabajo se realizará en el sector delimitado por al norte Calle Rafael María Arízaga, al sur Calle Larga, al este Av. Huayna Cápac y al oeste Calle Coronel Talbot.

1.5 METODOLOGÍA

Para la realización del presente trabajo se revisó libros, publicaciones de revistas científicas y reportes institucionales relacionados al tema de polución lumínica. Luego se pudo recopilar datos de campo para conocer la cantidad de luz no necesaria producida por el alumbrado público y que está enfocada a las fachadas de las viviendas. Mediante cálculos se ha estimado la energía consumida para iluminar dichas áreas, y se ha planteado posibles soluciones para reducir este problema.

1.6 PROBLEMAS NO RESUELTOS

- No se tiene cuantificado la cantidad de energía mal utilizada por el alumbrado público que ilumina las fachadas de las edificaciones del centro histórico de la ciudad de Cuenca.
- No se tiene identificadas las áreas de las viviendas afectadas por iluminación innecesaria del alumbrado público.

1.7 HIPÓTESIS

La evaluación de la polución lumínica causada por el alumbrado público sobre las fachadas de las viviendas en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, nos permitirá adoptar medidas preventivas para evitar este efecto, así como evitar el uso innecesario de energía para alumbrar estas áreas.



1.8 VARIABLES

- Tipo y disposición de lámparas
- Tipo y disposición de luminarias
- Clima

1.9 MÉTODOS UTILIZADOS

- Analíticos
- Estadísticos
- Investigación de campo

CAPÍTULO 2

2. ALUMBRADO PÚBLICO Y POLUCIÓN LUMÍNICA

2.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo detalla los conceptos generales sobre luminotecnia, los conceptos teóricos relacionados con los fundamentos técnicos del alumbrado público y la polución lumínica. Se analizará los diferentes tipos de luminarias utilizadas para el alumbrado público y se las clasificará según su simetría de distribución.

Posteriormente se indican los requisitos necesarios para un sistema de alumbrado público y se analizará la contaminación lumínica según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público”.

2.2 CONCEPTOS GENERALES SOBRE LUMINOTÉCNIA

2.2.1 MAGNITUDES LUMINOSAS

Para el estudio de iluminación debemos tener en cuenta dos elementos principales, el objeto a ser iluminado y la fuente productora de luz.

La luz puede ser definida como: “La parte de la energía radiante evaluada visualmente, es decir, la energía que, al interactuar con alguna superficie, se refleja o se transmite hacia el sistema visual y produce la respuesta de los fotoreceptores, dotando al ser humano del sentido de la visión” [2].

2.2.1.1 FLUJO LUMINOSO

El Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” define el flujo luminoso como: “Cantidad de luz emitida por una fuente luminosa en todas las direcciones por unidad de tiempo” [3]. El flujo luminoso es representado por la letra griega Φ (fi) y su unidad de medida es el lumen (lm).



Figura 2. 1 Representación de flujo luminoso.

Fuente: <http://images.search.yahoo.com>

En la Tabla 2.1 se indica los valores de flujo luminoso emitido por determinadas lámparas.

Tabla 2. 1 Flujo luminoso emitido por algunas lámparas.

Flujo luminoso emitido por algunas lámparas		
Tipo de lámpara	Potencia (W)	Flujo luminoso (Lm)
Incandescente	100	1380
Flourescente	36	3250
Mercurio de alta presión	400	22000
Sodio de baja presión	35	4800
Sodio de alta presión	400	47000
Halogenuros metálicos	250	17000

Fuente: <http://assets.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171721.pdf>

2.2.1.2 EFICIENCIA LUMINOSA

También conocido como el rendimiento luminoso de una fuente de luz. El Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” la define como: “Relación entre el flujo luminoso total emitido por una fuente luminosa (lámpara) y la potencia de la misma” [3]. La eficiencia luminosa es representada por la letra griega η (eta), su unidad de medida de la es el lumen por vatio (lm/W) y la fórmula que lo representa es:

$$\eta = \frac{\phi}{W} \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$$

Se puede decir que una lámpara tiene una eficiencia luminosa perfecta cuando no presenta pérdidas, pero esto es solo teórico ya que siempre existirá un porcentaje que se desperdicie.

En la Tabla 2.2 se indica el rendimiento luminoso emitido por determinadas lámparas.

Tabla 2. 2 Rendimiento luminoso de algunas lámparas.

Rendimiento luminoso de algunas lámparas		
Tipo de lámpara	Potencia (W)	Rendimiento luminoso (Lm/W)
Incandescente	100	15 - 25
Flourescente	40	80
Mercurio de alta presión	400	58
Sodio de baja presión	180	183
Sodio de alta presión	250	120 - 130
Halogenuros metálicos	360	70

Fuente: Autor, <http://www.celfosc.org/biblio/general/herranz-olle-jauregui2011.pdf>

2.2.1.3 CANTIDAD DE LUZ

Se la conoce también como energía luminosa, determinada según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” como: “Energía que se propaga en forma de ondas electromagnéticas” [3]. La cantidad de luz es representada por la letra Q y su unidad de medida es el lumen por hora (lmh).

$$Q = \phi \times t$$

2.2.1.4 INTENSIDAD LUMINOSA

Definida por el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” como: “Cantidad de flujo luminoso en cada unidad de ángulo sólido en la dirección en cuestión. Por lo tanto, es el flujo luminoso sobre una pequeña superficie centrada y normal en esa dirección, dividido por el ángulo sólido (en estereorradianes) el cual es subtendido por la superficie en la fuente I” [3]. La intensidad luminosa es representada por la letra I, y su unidad de medida es la candela (cd) o en lúmenes por estereorradián (lm/sr). La Norma Técnica para el Diseño de Redes Eléctricas Urbanas y Rurales de la Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A. (EERSSA), define a la candela como: “La intensidad luminosa, en una dirección dada, que emite una fuente de radiación monocromática, de

frecuencia 540×10^{12} Hz, de forma que la intensidad de la radiación emitida, en la dirección indicada, es de 1/683 W por estereoradián” [4].

La intensidad luminosa es expresada como:

$$I = \frac{\phi}{\omega} \left[\frac{\text{lm}}{\text{st}} \right]$$

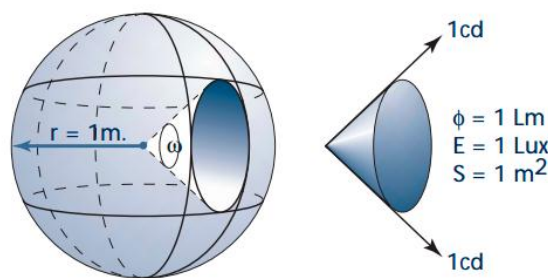


Figura 2. 2 Ángulo sólido.

Fuente: <http://images.search.yahoo.com>

2.2.1.5 ILUMINANCIA

También denominada iluminación, y es definida por el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” como: “Densidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie. La unidad de iluminancia es el lux (lx).” [3].

Si aumentamos el flujo luminoso sobre una superficie, la iluminancia será mayor; de igual manera si tenemos un mismo flujo luminoso y disminuimos la superficie esta iluminancia aumentará. La iluminancia es utilizada para determinar el nivel de iluminación que existe en un lugar determinado. Se la representa por la letra E y se la expresa como:

$$E = \frac{\phi}{S} \left[\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right]$$

Según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” define el lux como: “Unidad de medida de iluminancia en el Sistema Internacional (SI). Un lux es igual a un lumen por metro cuadrado ($1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$)” [3].

2.2.1.6 LUMINANCIA

La Norma Técnica para el Diseño de Redes Eléctricas Urbanas y Rurales de la EERSSA, define a la luminancia como: “Intensidad luminosa emitida por unidad de área de una superficie en una dirección especificada” [4]. Se la representa por la letra L, su unidad de medida es la candela por metro cuadrado y es expresada como:

$$L = \frac{I}{S \times \cos\beta} \left[\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \right]$$

El valor de luminancia será máximo cuando el observador se encuentre en posición perpendicular a la superficie luminosa, debido a que el ángulo β es cero, por lo tanto, el valor del coseno será 1.

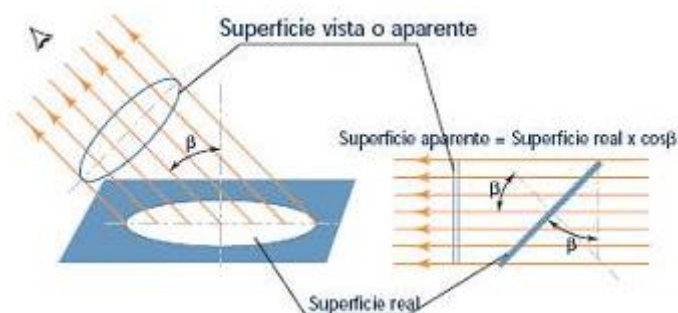


Figura 2. 3 Luminancia de una superficie.

Fuente: <http://images.search.yahoo.com>

En la Tabla 2.3 podemos ver los niveles de luminancia máximos permitidos para las diferentes zonas de contaminación lumínica.

Tabla 2. 3 Luminancia máxima permitida.

	Valores máximos de Luminancia			
	Observatorios astronómicos de categoría internacional E1	Áreas rurales E2	Áreas urbanas residenciales E3	Centros urbanos con elevada actividad nocturna E4
Luminancia media de las fachadas (L_m)	5 cd/m^2	5 cd/m^2	10 cd/m^2	25 cd/m^2
Luminancia máxima de las fachadas (L_{max})	10 cd/m^2	10 cd/m^2	60 cd/m^2	150 cd/m^2
Luminancia máxima de señales de anuncios luminosos (L_{max})	50 cd/m^2	400 cd/m^2	80 cd/m^2	1000 cd/m^2

Fuente: Autor, <http://grlum.dpe.upc.edu/manual/disenProyecto-requisitosDiseno.php>

2.3 FUNDAMENTOS TÉCNICOS DEL ALUMBRADO PÚBLICO

2.3.1 DEFINICIONES

Según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” tenemos las siguientes definiciones:

2.3.1.1 ALCANCE

“Característica de una luminaria que indica la extensión que alcanza la luz en la dirección longitudinal del camino” [3].

2.3.1.2 ALTURA DE MONTAJE (EN UNA VIA)

“Distancia vertical entre la superficie de la vía por iluminar y el centro óptico de la fuente de luz de la luminaria” [3].

2.3.1.3 CENTRO ÓPTICO DE LA LÁMPARA

“Centro de una pequeña esfera que podría contener completamente el elemento emisor de la lámpara” [3].

2.3.1.4 COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN (CU Ó K)

“Relación entre el flujo luminoso que llega a la superficie a iluminar (flujo útil) y el flujo total emitido por una luminaria. Usualmente, se aplica este término cuando se refiere a luminarias de alumbrado público. También se conoce como factor de utilización de la luminaria” [3].

2.3.1.5 CURVA ISOLUX

“Línea que une todos los puntos que tengan la misma iluminancia en el plano horizontal, para una altura de montaje de 1 m y un flujo luminoso de 1 000 lm” [3].

2.3.1.6 DESLUMBRAMIENTO

“Sensación producida por la luminancia dentro del campo visual que es suficientemente mayor que la luminancia a la cual los ojos están adaptados y que es causa de molestias e incomodidad o pérdida de la capacidad visual y de la visibilidad. La magnitud de la sensación del deslumbramiento depende de factores como el tamaño, la posición y la luminancia de la fuente, el número de fuentes y la luminancia a la que los ojos están adaptados” [3].

2.3.1.7 DIAGRAMA POLAR.

“Gráfica que representa en coordenadas polares la distribución de las intensidades luminosas en planos definidos. Generalmente se representan los planos $C = 0^\circ - 180^\circ$, $C = 90^\circ - 270^\circ$ y plano de intensidad máxima” [3].

2.3.1.8 EFECTO ESTROBOSCÓPICO

“Ilusión óptica que ocasiona que un objeto iluminado por una lámpara de descarga sea visible a intervalos, dando la impresión de aparente inmovilidad. Este efecto ocurre cuando la velocidad a la que se mueve el objeto es múltiplo de los destellos periódicos de las lámparas” [3].

2.3.1.9 EFICIENCIA DE UNA LUMINARIA.

“Relación de flujo luminoso, en lúmenes, emitido por una luminaria y el emitido por la lámpara o lámparas usadas en su interior” [3].

2.3.1.10 FLUJO HEMISFÉRICO SUPERIOR (FHS).

“Se define como el flujo luminoso emitido por el equipo de iluminación (luminaria y lámpara) por encima del plano horizontal. Dicho plano corresponde al ángulo $\gamma = 90^\circ$ en el sistema de representación (C, γ). El flujo hemisférico se expresa como un porcentaje del flujo total emitido por la luminaria” [3].

2.3.1.11 FOTOMETRÍA

“Medición de cantidades asociadas con la luz. La fotometría puede ser visual cuando se usa el ojo para hacer una comparación, o física, cuando las mediciones se hacen mediante receptores físicos” [3].

2.3.1.12 MATRIZ DE INTENSIDADES.

“Tabla que, en función de los ángulos C y el ángulo γ , define los valores de intensidad luminosa que suministra la luminaria en cualquier punto a su alrededor. Los datos de intensidad luminosa se pueden dar en candelas por 1000 lm” [3].

2.3.2 LUMINARIAS

La norma UNE-EN 60588-1 (Norma Española), define luminaria como: “aparato de alumbrado que reparte, filtra o transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte, la fijación y la protección de lámparas, (excluyendo las propias lámparas) y, en caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación” [5].

2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LAS LUMINARIAS SEGÚN SU SIMETRÍA DE DISTRIBUCIÓN

Las luminarias con respecto a la simetría del flujo emitido, se pueden clasificar de la siguiente manera:

2.3.3.1 LUMINARIAS DE DISTRIBUCIÓN SIMÉTRICA

“En ellas el flujo luminoso se reparte simétricamente respecto al eje de simetría, y la distribución espacial de las intensidades luminosas puede representarse con una sola curva fotométrica” [6].

En la Figura 2.4 y 2.5 se indica la curva fotométrica y la iluminación de exteriores de una luminaria de distribución simétrica.

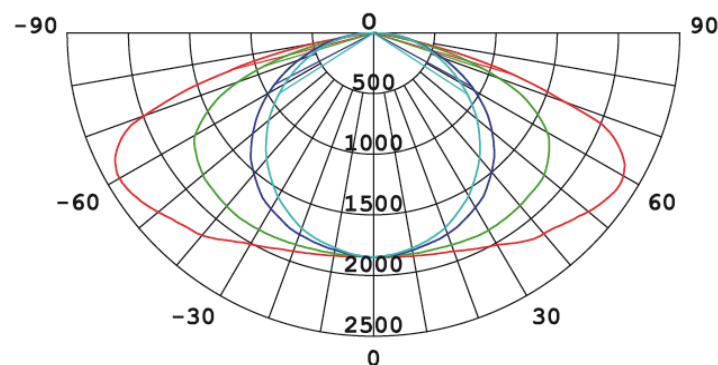


Figura 2. 4 Curva fotométrica de una luminaria con distribución simétrica.

Fuente: <http://images.search.yahoo.com>

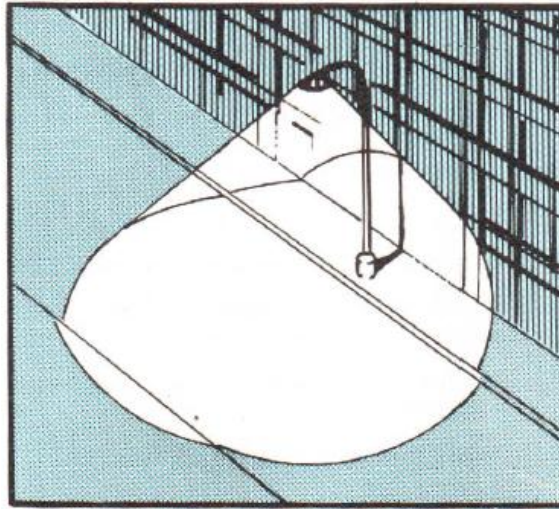


Figura 2. 5 Iluminación de exteriores producida por una luminaria con distribución simétrica.

Fuente: J. A. Taboada (1983), Manual de Luminotecnia.

2.3.3.2 LUMINARIAS DE DISTRIBUCIÓN ASIMETRICA

“En ellas el reparto de flujo luminoso no se hace de forma simétrica respecto a un eje, y la distribución espacial de las intensidades luminosas sólo puede expresarse mediante un sólido fotométrico, o por una representación plana de dicho sólido, o parcialmente, según diversos planos característicos de la luminaria” [6].

En la Figura 2.6 y 2.7 se indica la curva fotométrica y la iluminación de exteriores de una luminaria de distribución asimétrica.

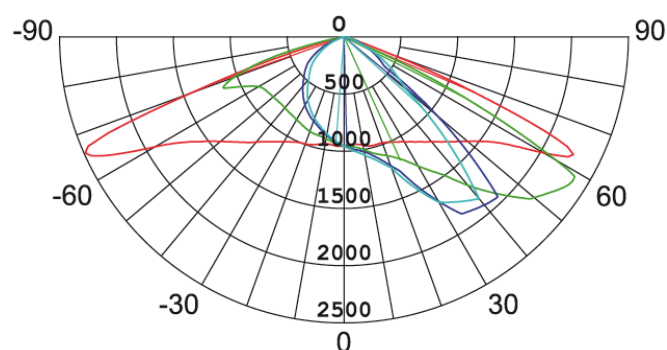


Figura 2. 6 Curva fotométrica de una luminaria con distribución asimétrica.

Fuente: <http://images.search.yahoo.com>

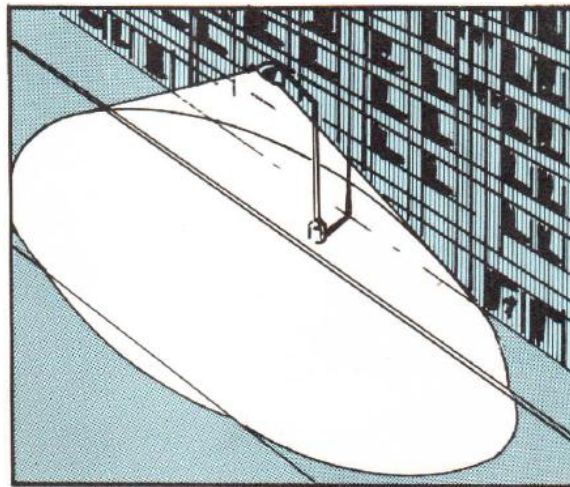


Figura 2. 7 Iluminación de exteriores producida por una lámpara con distribución asimétrica.

Fuente: J. A. Taboada (1983), Manual de Luminotecnia.

2.3.4 CLASIFICACIÓN DE LAS LUMINARIAS EMPLEADAS EN ALUMBRADO PÚBLICO

La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) ha clasificado las luminarias para el alumbrado público, en las siguientes categorías:

2.3.4.1 LUMINARIAS CUT-OFF O DE HAZ RECORTADO

“Luminaria para la cual la intensidad nula se alcanza para un ángulo de 90° sobre el nadir y para todos los ángulos mayores. Además que la distribución luminosa en $\text{cd}/1000 \text{ lm}$ no exceda numéricamente en 100 (10%) para un ángulo de 80° a partir del nadir. Esto se aplica para todos los ángulos laterales alrededor de la luminaria” [2].

En la Figura 2.8 y 2.9 se indica la iluminación exterior de la luminaria simétrica cut-off con su respectiva curva fotométrica.

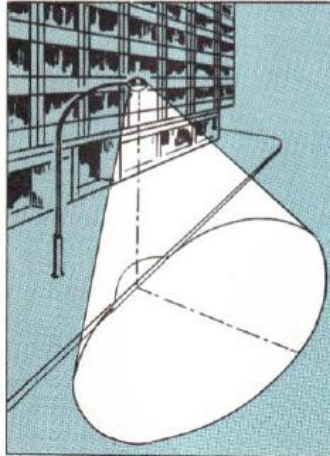


Figura 2. 8 Luminaria simétrica cut-off.

Fuente: J. A. Taboada (1983), Manual de Luminotecnia.

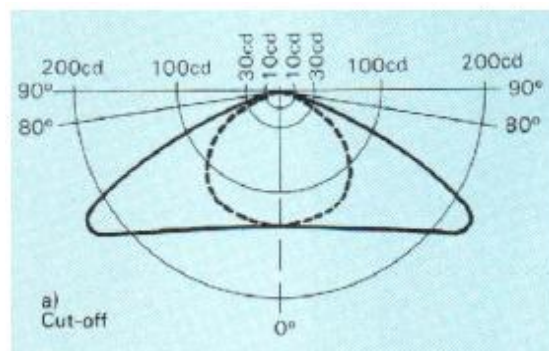


Figura 2. 9 Curvas fotométricas de luminaria simétrica cut-off.

Fuente: J. A. Taboada (1983), Manual de Luminotecnia.

2.3.4.2 LUMINARIAS SEMI CUT-OFF O DE HAZ SEMI RECORTADO

“Cuando la distribución luminosa en cd/1000 no excede numéricamente en 50 (5%) para un ángulo de 90° sobre el nadir y en 200 (20%) para un ángulo de 80 sobre el nadir. Esto se aplica para todos los ángulos laterales alrededor de la luminaria” [2].

En la Figura 2.10 y 2.11 se indica la iluminación exterior de la luminaria simétrica semi cut-off con su respectiva curva fotométrica.

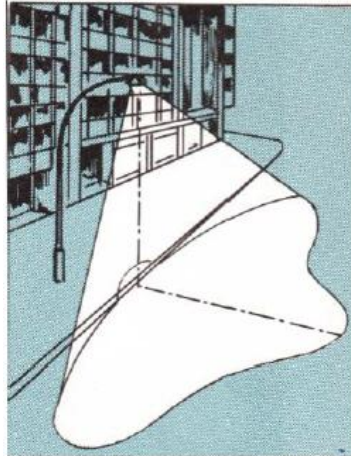


Figura 2. 10 Luminaria simétrica semi cut-off.

Fuente: J. A. Taboada (1983), Manual de Luminotecnia.

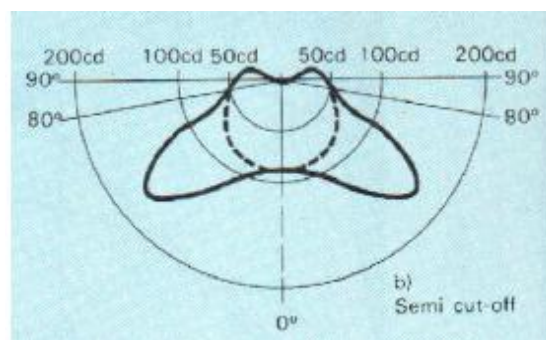


Figura 2. 11 Curvas fotométricas de luminaria simétrica semi cut-off.

Fuente: J. A. Taboada (1983), Manual de Luminotecnia.

2.3.4.3 LUMINARIAS NON CUT-OFF O DE HAZ NO RECORTADO

“Sin límite de distribución luminosa” [2].

“En ellas la intensidad luminosa en las direcciones que forman un ángulo superior a 80° con relación a la vertical hacia abajo no se reduce sencillamente, por lo cual la intensidad horizontal puede ser superior a la indicada para las luminarias «semi cut-off». Prácticamente no suprimen las radiaciones luminosas emitidas por debajo del plano horizontal. En la dirección que forma un ángulo de 85° con su eje vertical, la intensidad luminosa es de $1/2$ a $1/3$ máxima” [6].

En la Figura 2.12 y 2.13 se indica la iluminación exterior de la luminaria simétrica non cut-off con su respectiva curva fotométrica.

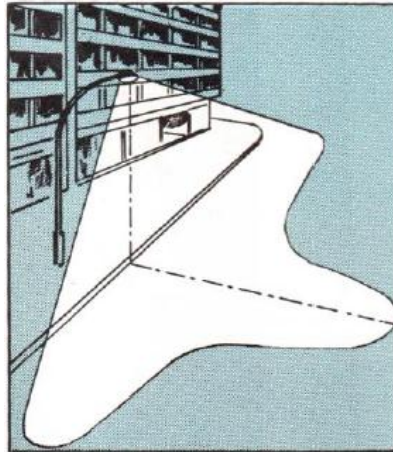


Figura 2. 12 Luminaria asimétrica no cut-off.

Fuente: J. A. Taboada (1983), Manual de Luminotecnia.

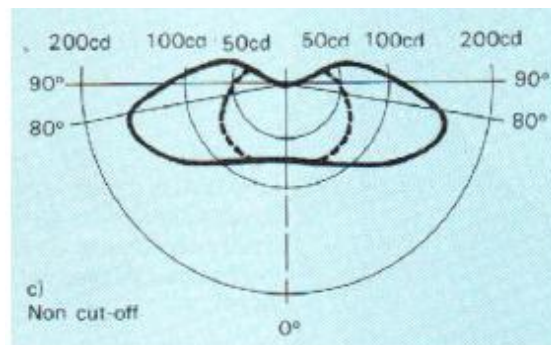


Figura 2. 13 Curvas fotométricas de luminaria simétrica non cut-off.

Fuente: J. A. Taboada (1983), Manual de Luminotecnia.

2.3.5 REQUISITOS NECESARIOS PARA UN SISTEMA DE ALUMBRADO PÚBLICO

2.3.5.1 VISIBILIDAD

“El objeto del alumbrado público es proporcionar la visibilidad adecuada para el desarrollo normal de las actividades tanto vehiculares como peatonales en vías públicas, parques públicos, y demás espacios de libre circulación. De igual manera, debe permitir a los conductores circular durante las horas de oscuridad

(noche y madrugada) en condiciones adecuadas de seguridad, comodidad y velocidad similares a las que se presentan en las horas del día (mañana y tarde)” [7].

2.3.5.2 CANTIDAD Y CALIDAD DE LUZ

Consiste en aplicar la cantidad adecuada de luz sobre un área determinada y que cumpla con las normas de calidad establecidas, “permitiendo a los usuarios de la calzada y del andén, circular sobre ellos en las horas de la noche, de manera segura y cómoda y a velocidades preestablecidas” [8].

2.3.5.3 SEGURIDAD

“La seguridad se logra si el alumbrado permite a los usuarios circular a velocidad normal y evitar cualquier obstáculo. Para este efecto, se considera que el criterio de seguridad consiste en la visibilidad de un obstáculo fijo o móvil constituido por una superficie de 0,20 m x 0,20 m con un factor de reflexión de 0,15” [7]. Se considera que:

- “La seguridad de un peatón se logra si este puede distinguir el obstáculo a una distancia de 10 m o más” [7].
- “La seguridad de un automovilista depende esencialmente de su velocidad. A velocidad media (60 km/h aproximadamente), él debe percibir este obstáculo a una distancia de hasta 100 m. Para velocidades superiores, esta distancia oscila entre 100 y 200 m” [7].

2.3.5.4 CONFIABILIDAD DE PERCEPCIÓN

“Los objetos sólo pueden percibirse cuando se tiene un contraste superior al mínimo requerido por el ojo. Este valor depende del ángulo con el que se vea (afecta la cantidad de superficie aparente en la fórmula de luminancia) y de la distribución de la luminancia en el campo visual del observador (fondo para el contraste). Además, este valor define el tiempo de adaptación del ojo en dicha situación” [8].

“La iluminancia debe proporcionar: un elevado nivel de iluminación en el fondo (luminancia promedio), un bajo nivel de luminancia para el obstáculo, que generalmente tiene un bajo coeficiente de reflexión; y mantener un limitado deslumbramiento desde las fuentes de luz” [8].

2.3.5.5 COMODIDAD VISUAL

“La comodidad de un sistema de alumbrado depende del patrón de luminancia, de su uniformidad, del nivel de iluminación, del grado de deslumbramiento y de la disposición y naturaleza de las fuentes luminosas. Estos criterios deben ser escogidos de tal manera que se propenda por el confort y la seguridad” [7].

“El ambiente visual de un conductor está constituido principalmente por la visión de la calzada al frente del volante y en menor grado por el resto de su campo visual, que puede llegar a tener información para el conductor, como las señales de tránsito. La comodidad visual es una importante característica que redundará en la seguridad del tráfico vehicular. La falta de comodidad se traducirá en una falta de concentración por parte de los conductores que reducirá la velocidad de reacción debido al cansancio que se producirá en sus ojos” [8].

2.4 POLUCIÓN LUMÍNICA

2.4.1 DEFINICIÓN

A continuación se presentan tres conceptos de polución lumínica, los mismos que han sido definidos por normativas e instituciones de investigación:

“La contaminación lumínica puede definirse como la emisión de flujo luminoso de fuentes artificiales nocturnas en intensidades, direcciones, rangos espectrales u horarios innecesarios para la realización de las actividades previstas en la zona en la que se instalan las luces” [9].

Contaminación lumínica.- “es la alteración innecesaria de la cantidad natural de luz presente en el medio nocturno. Esta alteración, innecesaria, está provocada por las emisiones de flujo luminoso producido por fuentes artificiales nocturnas en intensidades, direcciones, horarios o rangos espectrales innecesarios para la realización de las actividades previstas en la zona en que se han instalado las luminarias” [10].

Para el Departamento de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Barcelona: “Se entiende por contaminación lumínica la emisión de flujo luminoso de fuentes artificiales nocturnas en intensidades, direcciones y/o rangos espectrales donde no es necesario para la realización de las actividades previstas en la zona alumbrada” [11].

En función a estos conceptos podemos concluir que la contaminación lumínica o polución lumínica, es la emisión de flujo luminoso de fuentes artificiales en cantidades y direcciones que no cumplen con el propósito inicial de iluminar determinadas zonas.

2.4.2 CAUSAS Y EFECTOS DE POLUCIÓN LUMÍNICA [12] [13] [14]

Entre las principales causas de polución lumínica podemos mencionar:

- El uso de luminarias que, debido a un mal diseño luminotécnico o la mala disposición en el momento de ser ubicadas en las zonas de trabajo, dejan escapar buena parte del flujo luminoso fuera del área que se necesita iluminar.
- Exceso de iluminación, produce asimismo innecesarias pérdidas de luz y una gran cantidad de reflexión del flujo luminoso en la calzada y demás objetos reflejantes.
- Estudio inadecuado al momento de diseñar el sistema de alumbrado público, residencial y comercial que pueden usar reflectores, con fines

propagandísticos u ornamentales que emiten flujo luminoso en cualquier dirección.

- Falta de normativa sobre polución lumínica, de modo que permitan controlar y regular los diseños existentes y nuevos proyectos de iluminación, con lo cual se lograría reducir los niveles de polución lumínica.

Las consecuencias presentes por la polución lumínica son:

a) Deslumbramiento

También conocido como resplandor. “Puede ser descrito como la luminancia no deseada de una fuente y definido como la sensación producida por la luminancia en el campo visual que es suficientemente intensa como para causar incomodidad o empobrecimiento de la visión” [15].

Se produce cuando las personas que transitan por la vía pública, pierden la percepción visual, y es ocasionada por exceso o carencia de luz. Este efecto es especialmente peligroso para el tráfico vehicular, dado que puede producir accidentes.

b) Iluminación del cielo

“Es el resultado de la luz que se escapa (como un todo) de las ciudades y que es dispersada por la atmósfera aumentando así los niveles del brillo natural del cielo. Este efecto es extremadamente perjudicial para la astronomía, flora y fauna silvestre, así como molesto para el público en general. El alumbrado público es responsable por aproximadamente el 50% del brillo urbano del cielo debido a que de la luz dirigida hacia el pavimento es reflejada hacia arriba a niveles de reflectancia que van desde el 6% para el asfalto a un 25% para el concreto y que se ve incrementado por los deficientes sistemas de iluminación” [15].

c) Intrusión lumínica

“Puede ser descrita como la luz o la iluminancia que se escapa de su propósito original de iluminación. En el caso de un sistema de iluminación pública, se desea tener toda la luz dirigida sobre la vía y no en el área adyacente. Las lámparas de baja calidad de iluminación, las que generalmente no son del tipo corte-apagado (consiste en evitar la iluminancia directa desde las luminarias por sobre el plano horizontal), dejarán que algo de luz caiga lejos de la vía misma, como casas, habitaciones y patios” [15].

d) Desperdicio de energía

Se da un problema de sobreconsumo con lo cual se tiende a desperdiciar y gastar más energía de la necesaria. La contaminación lumínica genera pérdidas de energía que se traducen en altos costos de mantenimiento y operación. Alrededor del 30% de la luz de exterior se está desperdiciando por el resplandor que se escapa hacia arriba.

e) Afecciones al ser humano

“En cuanto al ser humano, y su relación salud y medio ambiente, debido a este fenómeno, puede presentar molestias y dificultades de visión, fatiga mental y fisiológica, alteraciones del sueño, trastornos en el reloj biológico, falsa sensación de seguridad, pérdida de privacidad, invasión de insectos, pérdidas de serenidad y armonía en el contacto con la naturaleza” [16].

f) Afecciones en flora y fauna

“La polución lumínica altera la actividad de varios seres vivos en especial sus ciclos biológicos, puede afectar su reproducción llegando a límites que pueden ser mortales para las especies y las que sobreviven tiene mayores exigencias para adaptarse al nuevo hábitat. De igual manera la flora es afectada porque los insectos encargados de la polimerización ya no cumplen con este objetivo y se termina eliminando el proceso natural de

fertilización de las plantas” [17]. Existen problemas de fototropismo: Movimiento de ciertos organismos como respuesta al estímulo de la luz.

2.4.3 EMISIONES DE LUZ ARTIFICIAL QUE PRODUCEN POLUCIÓN LUMÍNICA

La polución lumínica puede ser producida por tres formas básicas de emisión de luz artificial:

2.4.3.1 EMISIÓN DIRECTA

“Es el más perjudicial. Se produce principalmente por focos o proyectores para el alumbrado de grandes áreas públicas. Estos focos tienen una inclinación superior a los 20°, por ello parte del flujo de la lámpara es enviado directamente sobre el horizonte, desperdiciando energía luminosa” [15].

Ejemplos de este tipo de emisión son:

- Luminarias en forma de faros globos usados para decorar o realzar zonas patrimoniales e históricas sin control sobre su flujo luminoso.
- Tableros publicitarios con luces que se distribuyen en dirección del cielo.

2.4.3.2 EMISIÓN INDIRECTA

También denominada emisión por reflexión. “Suele tener un impacto inferior a 10 veces el impacto Directo. La diferencia principal con el Directo es que tiene un bajo brillo (millares de veces inferior). Su impacto es importante en grandes instalaciones [15].

Se puede tener diferentes tipos de reflexión entre ellas: la dirigida, semi directa, difusa y semi difusa. La reflexión depende de las propiedades físicas de los objetos encontrados en el camino el rayo luminoso.

2.4.3.3 EMISIÓN POR REFRACCIÓN

“La refracción suele tener un impacto muy despreciable con respecto a las otras dos y su influencia depende del tamaño y cantidad de partículas del aire entre la fuente de luz y la zona iluminada. Disminuye con la distancia entre la fuente y la zona iluminada” [15].

2.4.4 IMPACTO DE LAS LÁMPARAS COMO CONTAMINANTE LUMÍNICO

Las lámparas al transformar la energía eléctrica en energía lumínica tienen que producir la mayor radiación en el espectro visible que sirva para el ojo humano, la luz producida debe tener una buena reproducción cromática similar a la del día. Se busca que la mayor radiación se encuentre en la zona de los 555 nanómetros (nm).

En la Figura 2. 14 se presenta el espectro electromagnético visible por el ojo humano.

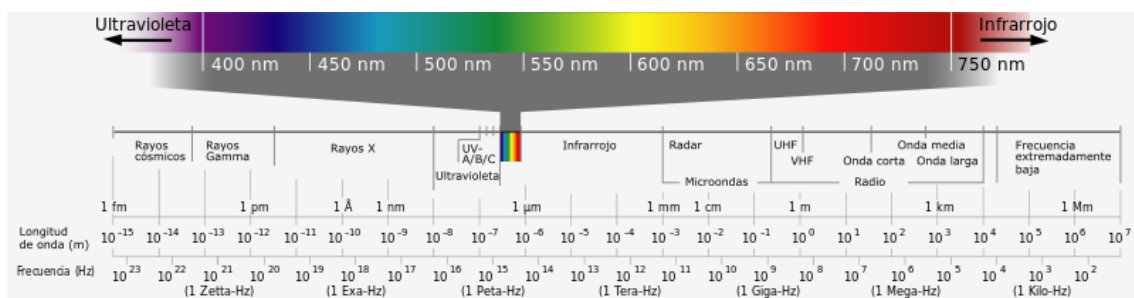


Figura 2. 14 Espectro electromagnético.

Fuente: <http://images.search.yahoo.com>

“El espectro de las lámparas (el color de luz que emiten), está directamente relacionado con el impacto que determinadas iluminaciones pueden tener sobre la salud humana y sobre la calidad del cielo nocturno” [18].

En la Figura 2. 15 podemos ver el espectro electromagnético emitido por algunas lámparas.

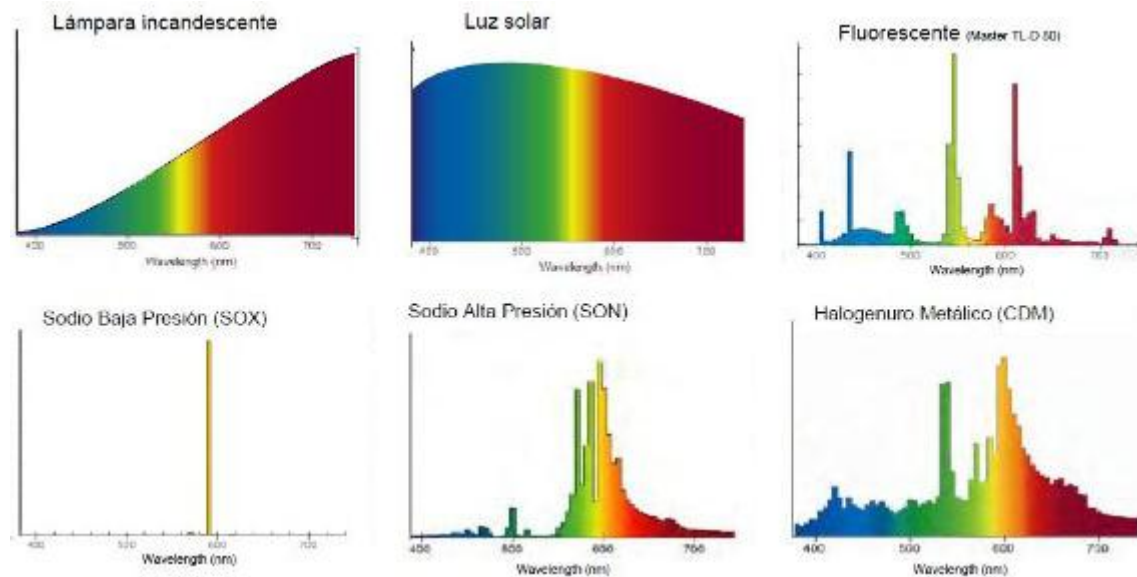


Figura 2. 15 Espectro de lámparas.

Fuente: <http://images.search.yahoo.com>

Las lámparas por su impacto contaminante en función de su espectro se clasifican en:

- Bajo nivel contaminante.
- Medianamente contaminantes.
- Alto nivel contaminante.

En la Tabla 2.4 se describen principalmente las características de las diferentes lámparas clasificadas según su impacto contaminante.

Tabla 2. 4 Lámparas según su nivel contaminante.

NIVEL CONTAMINANTE	TIPO DE LÁMPARA	CARACTERÍSTICAS DEL ESPECTRO
Bajo nivel contaminante	Vapor de sodio a alta presión	Emiten sólo dentro del espectro visible. Su luz es amarillenta con rendimientos de color entre 20% y 80%, dependiendo del modelo. Es recomendable para todo tipo de alumbrado exterior. Son las más eficientes del mercado después de las de baja presión.
	Vapor de sodio a baja presión	Emite prácticamente sólo en una estrecha zona del espectro, dejando limpio el resto. Su luz es amarillenta y

		monocromática. Es recomendable para alumbrados de seguridad y carreteras fuera de núcleos urbanos. Son las más eficientes del mercado y carece de residuos tóxicos y peligrosos. (90%)
Medianamente contaminantes	Incandescente	No emiten en el ultravioleta pero si en el infrarrojo cercano. Su espectro es continuo. Su luz es amarillenta con un rendimiento de color del 100%. No es recomendable para alumbrado exterior, excepto para iluminar detalles ornamentales. Son las más ineficaces del mercado.
	Incandescentes Halógenas	Son iguales que las incandescentes pero emiten algo más en el ultravioleta si no va provista de un cristal difusor (son peligrosas sin este cristal por emitir en el ultravioleta duro). Son algo más eficaces que las incandescentes.
	Fluorescentes en tubos y compactas	Emiten en el Ultravioleta. Su luz es blanca con rendimientos cromáticos entre el 40% y el 90%. Es recomendable para alumbrados peatonales y de jardines. Tienen una alta eficiencia.
Alto nivel contaminante	Vapor de Mercurio de Alta presión	Tienen una elevada emisión en el ultravioleta. Su luz es blanca con rendimientos de color inferiores al 60%. Es recomendable para zonas peatonales y de jardines. Son las menos eficientes del mercado en lámparas de descarga.
	Halogenuros metálicos	Tienen una fortísima emisión en el ultravioleta. Su luz es blanca azulada con rendimientos de color entre el 60% y el 90%. Es recomendable para eventos deportivos importantes y grandes zonas donde se requiera un elevado rendimiento cromático. Son muy eficaces, parecidas al sodio de alta presión, pero de corta vida.

Fuente: Juan Arturo Hernández Ortiz. Ahorro de energía y Reducción de la Contaminación Lumínica (2010).

2.4.5 CONTAMINACIÓN LUMÍNICA SEGÚN NORMA ECUATORIANA RTE INEN 069 “ALUMBRADO PÚBLICO”

El Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público”, define la contaminación lumínica como: “la propagación de luz artificial hacia el cielo nocturno. Igualmente, se tiene contaminación luminosa al iluminar espacios que no se requieren iluminar. La contaminación lumínica es producto de un diseño o montaje inadecuado, por lo que la solución se debe dar desde la etapa de diseño de los proyectos” [3].

La contaminación lumínica puede originarse por: [3]

- La utilización de luminarias con globos sin reflector o proyectores y luminarias que no controlan el flujo luminoso por encima de la horizontal.
- La inadecuada distribución del flujo luminoso de las luminarias en especial las ornamentales y proyectores.
- La falta de control sobre la iluminación decorativa en edificios, (anuncios publicitarios mal diseñados e instalados e inadecuados diseños de luminarias ornamentales).
- La reflexión de las vías y de los elementos que hacen parte del mobiliario urbano.

Según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” la contaminación lumínica puede manifestarse de diversas formas que pueden clasificarse dentro de cuatro categorías:

- Difusión de luz hacia el cielo

“Se produce por la difusión de la luz por parte de las moléculas del aire y del polvo en suspensión. Esto produce que parte del haz sea desviado de su dirección original y acabe siendo dispersado en todas las direcciones, en particular hacia el cielo” [3].



- Deslumbramiento

“Se produce cuando las personas que transitan por la vía pública, pierden la percepción visual, y es ocasionada por exceso o carencia de luz. Este efecto es especialmente peligroso para el tráfico vehicular, dado que puede producir accidentes” [3].

- Contraste

“La visibilidad de un objeto situado sobre un fondo, depende de la diferencia de las luminancias entre el objeto y el fondo” [3].

- Intrusión lumínica

“Se produce cuando la luz artificial procedente de las luminarias entra por las ventanas invadiendo el interior de las viviendas, modificando el entorno doméstico y provocando trastornos de las actividades humanas” [3].

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 ANTECEDENTES

En cuando a la metodología para determinar la cantidad de luz no necesaria por el alumbrado público y que está enfocada a las fachadas de las edificaciones adyacentes, no existe un manual que indique cómo realizarlo.

En el presente capítulo se describen las diferentes convenciones y procedimientos para la obtención de datos fotométricos, así como también la metodología a utilizar para el trabajo de campo del presente estudio el mismo que estará basado en el análisis de los datos fotométricos de la luminaria los cuales nos proporcionan información práctica de la luz sobre la superficie a iluminar de las distintas luminarias utilizadas en el alumbrado público existente en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca.

La metodología ha sido propuesta con una base lógica sobre el área que efectivamente es necesario iluminar, calculando la intensidad luminosa que emite una luminaria en todos sus planos e integrando únicamente el área en donde la intensidad luminosa afecta a las fachadas de edificaciones adyacentes sin que este sea el propósito inicial.

3.2 ÁREA DE ESTUDIO

El sector considerado para el presente estudio será el Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca, el mismo que se encuentra delimitado al norte por la Calle Rafael María Arízaga, al sur Calle Larga, al este Av. Huayna Cápac y al oeste Calle Coronel Talbot.

El Centro Histórico de la ciudad de Cuenca, es un lugar turístico declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en el año de 1999, ocupa 224,14

hectáreas¹ donde podemos apreciar casas e iglesias construidas en el siglo XIX como principales características turísticas. Además hay museos, mercados, parques, plazas y la zona del Barranco, junto al río Tomebamba.

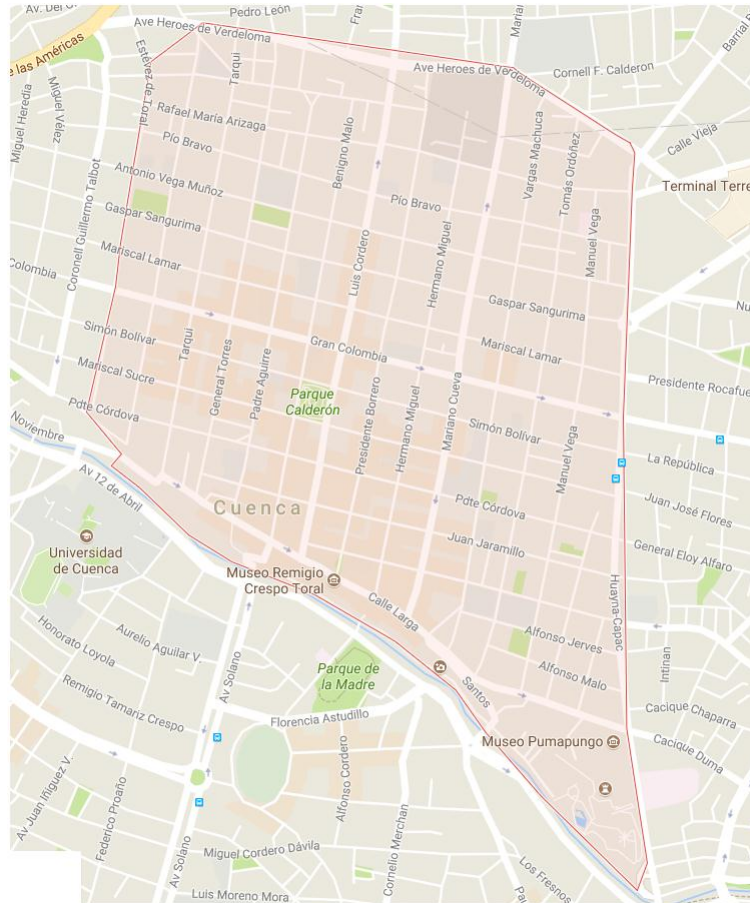


Figura 3. 1 Mapa del centro histórico de la ciudad de Cuenca.

Fuente: Mapa de Google Earth.

3.3 PROPUESTA PARA LA CARACTERIZACIÓN

A continuación se indican algunos términos que según la Comisión Internacional de Iluminación en su Informe Técnico sobre Fotometría y Goniofotometría de

¹ Centre, UNESCO World Heritage. «<http://whc.unesco.org/es/list/863>». whc.unesco.org.

Luminarias son necesarios tener en cuenta al momento de obtener y analizar los datos fotométricos de una luminaria.

3.3.1 TÉRMINOS RELACIONADOS CON LA LUMINARIA

3.3.1.1 DISPOSICIÓN DE MEDICIÓN (DE UNA LUMINARIA)

“La disposición en la que se mide la luminaria” [19]. También denominada la inclinación durante la medición.

3.3.1.2 CENTRO DE LUZ (DE UNA FUENTE)

“Punto usado como origen de las mediciones y cálculos fotométricos” [19].

3.3.1.3 CENTRO FOTOMÉTRICO

“El punto de una luminaria o lámpara desde el que la ley fotométrica de la distancia fotométrica se aproxima más a la realidad en la dirección de la intensidad máxima” [19].

3.3.1.4 EJE PRIMARIO (DE LA LUMINARIA)

“Un eje que contiene el centro fotométrico, usado en mediciones fotométricas como una dirección de referencia para correlacionar las mediciones fotométricas con la disposición de la luminaria” [19]. También denominado eje de referencia.

3.3.1.5 EJE SECUNDARIO (DE LA LUMINARIA)

“Un eje que contiene el centro fotométrico, perpendicular al eje (referencia) primario, ligado a la luminaria y usado junto con el eje primario para definir la disposición de la luminaria” [19]. También denominado eje auxiliar.

3.3.2 TÉRMINOS RELACIONADOS CON LAS CANTIDADES MEDIDAS EN LAS LUMINARIAS

3.3.2.1 DATOS DE LUMINARIA POR 1000 LM (DEL FLUJO DE LÁMPARA)

“Datos fotométricos de una luminaria relativos a un flujo luminoso teórico total de 1000 lm desde todas las lámparas de la luminaria, cuando éstas funcionan fuera de la luminaria bajo condiciones de referencia pero con el(los) balasto(s)” [19].

3.3.2.2 DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD LUMINOSA (DE UNA LUMINARIA)

“La distribución de la intensidad luminosa con la dirección. La distribución de la intensidad luminosa puede representarse mediante tablas numéricas o gráficas y normalmente se expresa en unidades de candela por 1000 lm de flujo luminoso” [19].

3.3.2.3 FACTOR DE SALIDA LUMINOSA (DE UNA LUMINARIA) LOR

“Razón entre el flujo luminoso de la luminaria, medido bajo condiciones prácticas específicas con su propia lámpara y equipo, y la suma de los flujos luminosos individuales de las mismas lámparas cuando funcionan fuera de la luminaria con el mismo equipo bajo condiciones especificadas” [19].

3.3.2.4 FRACCIÓN DE FLUJO HACIA ARRIBA UFF

“Fracción respecto al flujo luminoso total de una luminaria emitido por encima (por debajo) del plano horizontal que contiene el centro fotométrico de la luminaria” [19].

3.3.2.5 FACTOR DE CONVERSIÓN DE SERVICIO

“Factor para convertir datos fotométricos asociados a las condiciones de ensayo normales en datos asociados a las condiciones de servicio que difieren de las condiciones normales” [19].

3.3.3 TÉRMINOS ASOCIADOS A LAS MEDICIONES

3.3.3.1 MEDICIÓN ABSOLUTA

“Una medición expresada en las unidades apropiadas del Sistema Internacional (SI) de unidades” [19].

3.3.3.2 MEDICIÓN RELATIVA

“Una medición obtenida como cociente de dos cantidades del mismo tipo expresadas en unidades arbitrarias, o una medición en unidades del SI relativa a un flujo de lámpara desnuda especificado” [19].

3.3.3.3 MEDICIÓN DE LÁMPARA DESNUDA

“Una medición en la que la lámpara esta fotometrizada separadamente de una luminaria para determinar los datos del factor de salida de la luminaria por 1000 lm de flujo de lámpara” [19].

3.3.4 TÉRMINOS RELACIONADOS A LOS INSTRUMENTOS DE MEDIDA

3.3.4.1 FOTÓMETRO

“Instrumento para medir cantidades fotométricas” [19].

3.3.4.2 GONIOFOTÓMETRO

“Fotómetro para medir las características direccionales de la distribución de la luz emitida por fuentes, luminarias, medios o superficies” [19]. También denominado como fotómetro de distribución.

3.3.5 SISTEMAS DE COORDENADAS PARA LA FOTOMETRÍA DE LA LUMINARIA [19]

“La determinación de la distribución de la intensidad de una luminaria en el espacio implica el uso de un sistema de coordenadas cuyo centro coincida con el centro fotométrico de la luminaria” [19].

Los datos fotométricos de una luminaria están formados por una serie de valores de la intensidad luminosa en diferentes direcciones. Los sistemas de coordenadas presentados a continuación consisten en un conjunto de planos con un único eje de intersección y dirección. La orientación del plano depende del tipo de luminaria, el tipo de lámpara, la altura de montaje y su aplicación.

3.3.5.1 SISTEMAS DE PLANOS DE MEDICIÓN

3.3.5.1.1 PLANOS-A

“El sistema de planos-A es el grupo de planos para el que la línea de intersección (eje polar) pasa a través del centro fotométrico y es perpendicular al plano que contiene el primer y el segundo eje de la luminaria” [19].

El sistema de planos-A se acopla rigidamente a la luminaria y sigue su inclinación si la luminaria esta inclinada. El primer eje es el eje que atraviesa el centro fotométrico y es perpendicular a la superficie emisora de la luz. Cae en el semiplano $A = 0^\circ$, normalmente en la dirección $\alpha = 0^\circ$. El segundo eje también pasa a través del centro fotométrico de la luminaria y es perpendicular al plano $A = 0^\circ$.

Este tipo de coordenadas se usa en la fotometría de la luminaria de alumbrado interior.

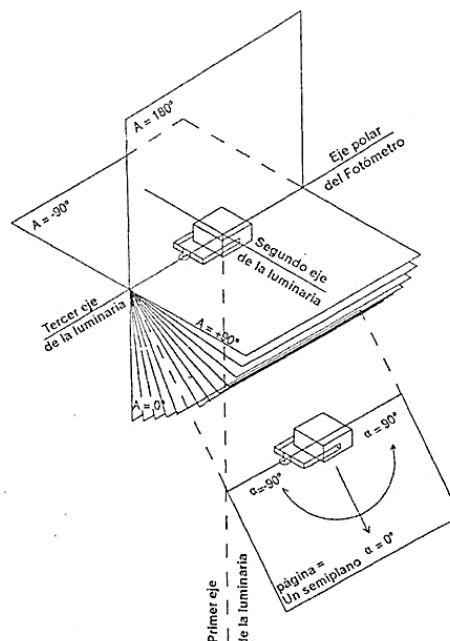


Figura 3. 2 Orientación de la luminaria para goniofotometría A,α

Fuente: CIE 121-1996 Comisión Internacional de Iluminación, Fotometría y Goniofotometría de Luminarias.

3.3.5.1.2 PLANOS-B

“El sistema de planos-B es el grupo de planos para el que la línea de intersección (eje polar) pasa por el centro fotométrico y es paralelo al segundo eje de la luminaria” [19].

Al igual que el sistema de planos-A, el sistema de planos-B se acopla rígidamente a la luminaria y sigue su inclinación si la luminaria está inclinada. El primer es el eje que atraviesa el centro fotométrico y es perpendicular a la superficie emisora de luz. Cae en el semiplano $B = 0^\circ$, normalmente en la dirección $\beta = 0^\circ$. El segundo eje coincide con la línea de intersección de los planos-B.

Este sistema de coordenadas se usa normalmente en la fotometría de focos reflectores.

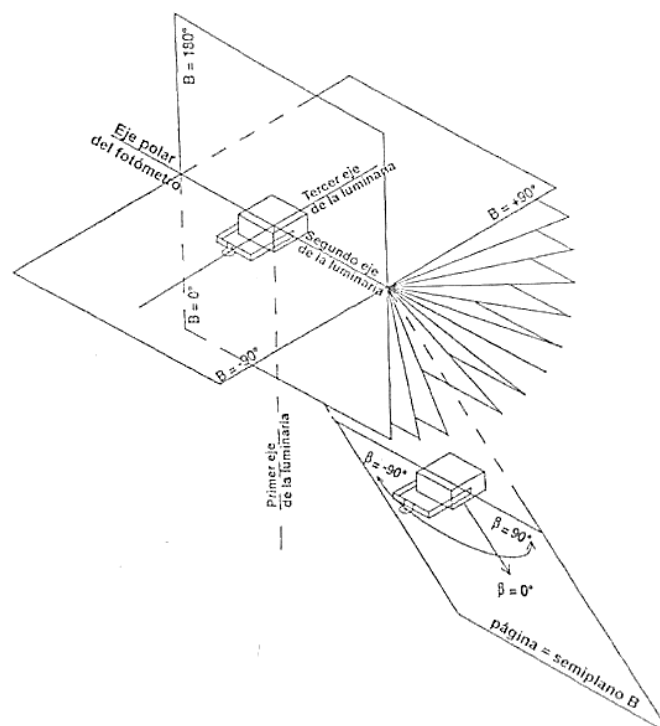


Figura 3. 3 Orientación de la luminaria para goniofotometría B, β

Fuente: CIE 121-1996 Comisión Internacional de Iluminación, Fotometría y Goniofotometría de Luminarias.

3.3.5.1.3 PLANOS-C

“El sistema de planos-C es el grupo de planos para el que la línea de intersección (eje polar) es la línea vertical que pasa a través del centro fotométrico” [19].

A diferencia de los sistemas antes mencionados, el sistema de planos-C está generalmente orientado rígidamente en el espacio y no sigue la inclinación de la luminaria. La línea de intersección de los planos-C sólo es perpendicular a las líneas de intersección de los planos-A y -B para una inclinación cero de la luminaria. Esto no coincide necesariamente con el primer eje de la luminaria excepto en el caso de inclinación cero. El primer eje es normalmente el eje que pasa por el centro de fotometría y es perpendicular a la superficie emisora de luz. El segundo eje cae dentro del plano $C = 0^\circ$.

“Este sistema se usa normalmente en la fotometría de alumbrado interior y público. En el alumbrado interior, el tercer eje de la luminaria es el eje mayor, mientras que en el alumbrado público el segundo eje de la luminaria es normalmente paralelo al eje de la carretera” [19].

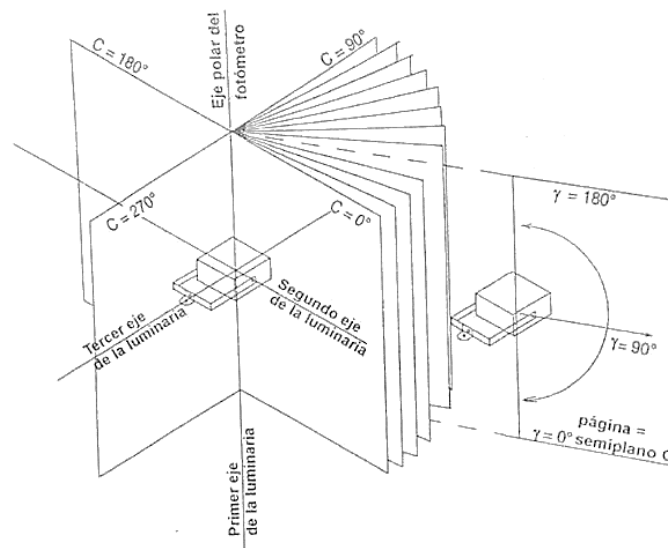


Figura 3. 4 Orientación de la luminaria para goniofotometría C, γ

Fuente: CIE 121-1996 Comisión Internacional de Iluminación, Fotometría y Goniofotometría de Luminarias.

3.3.6 CONVENCIONES Y PROCEDIMIENTOS [20].

Para los cálculos de iluminación de carreteras se consideran las siguientes convenciones matemáticas:

- Se considera a la luminaria como una fuente puntual de luz;
- No se tiene en cuenta la luz reflejada de los alrededores y la luz interreflejada;
- Se ignora la obstrucción de la luz de las luminarias por los árboles y otros objetos;
- La superficie de la carretera es plana y tiene propiedades reflectantes uniformes en la zona considerada;
- La atenuación atmosférica es cero.

Para la interpolación se utiliza la fórmula de Lagrange:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n y_i \prod_{j=1, j \neq i}^n \left(\frac{x - x_j}{x_i - x_j} \right)$$

Donde;

$y(x)$ es el valor interpolado de y en el punto x ;

n es el número de puntos entre los que se requiere la interpolación;

$(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_j, y_j) \dots (x_n, y_n)$ son los puntos entre los cuales la interpolación es necesario;

Σ significa la suma de los términos;

Π significa el producto de los términos.

3.3.6.1 CONVENCIONES MATEMÁTICAS PARA LAS DISTANCIAS MEDIDAS EN LAS CARRETERAS

Se utiliza un sistema de coordenadas rectangulares (x, y) como se ve en la Figura 3.5. El eje horizontal está alineado con la dirección de referencia, entonces:

$$x = x_p - x_l$$

$$y = y_p - y_l$$

Dónde:

$(x_p - x_l)$ son las coordenadas del punto de cálculo;

$(y_p - y_l)$ son las coordenadas de la luminaria.

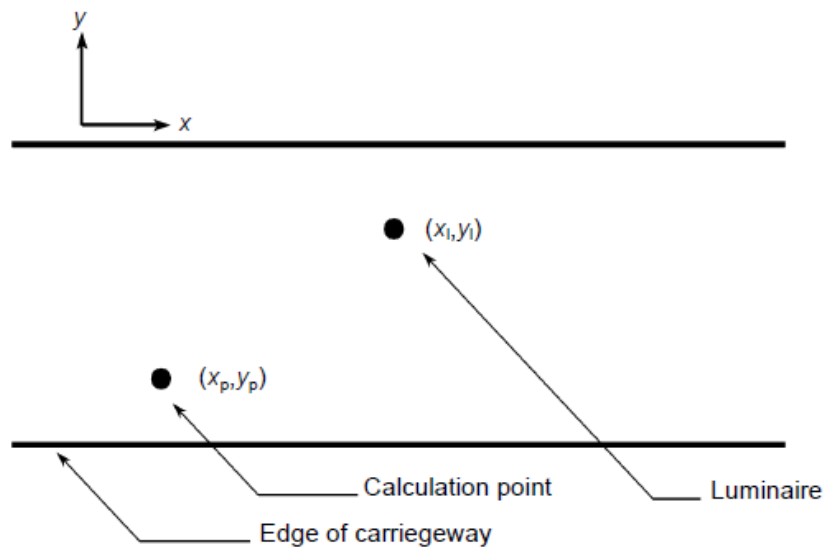


Figura 3. 5 Sistema de coordenadas para ubicar la luminaria en un plano.

Fuente: CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

3.3.6.2 CONVENCIONES MATEMÁTICAS PARA EJES DE LUMINARIAS

Una luminaria tiene tres ejes de rotación, por lo que es necesario trabajar con el sistema de coordenadas (x, y, z) . Se toma el origen en el centro fotométrico de la luminaria. La Figura 3.6 muestra los ejes de la luminaria en relación con el sistema de coordenadas (x, y, z) y el sentido de los movimientos de giro.

“El primer eje de la luminaria está fijado en el espacio y el segundo y tercer eje de la luminaria son mutuamente perpendiculares y pueden girarse alrededor del primer eje” [20].

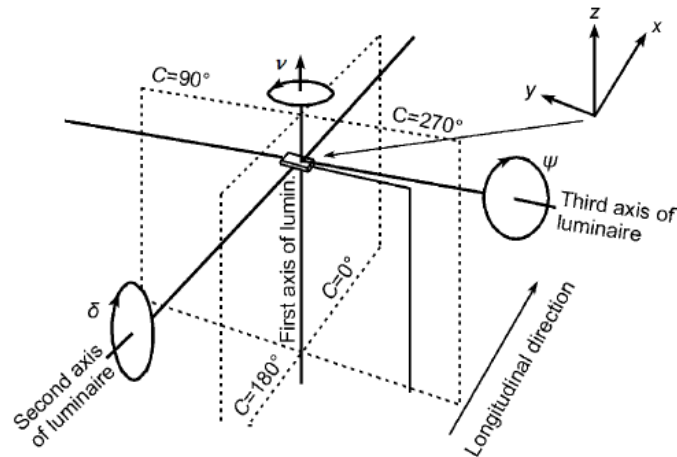


Figura 3. 6 Ejes para girar la luminaria, sistema de coordenadas (x, y, z).

Fuente: CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

La Figura 3.7 muestra la relación de inclinación para el cálculo y la inclinación durante la medición e inclinación en la aplicación. De esto es evidente que:

$$\delta = \theta_f - \theta_m$$

Dónde:

δ es la inclinación para el cálculo, en grados de arco;

θ_f es la inclinación en la aplicación, en grados de arco;

θ_m es la inclinación durante la medición, en grados de arco.

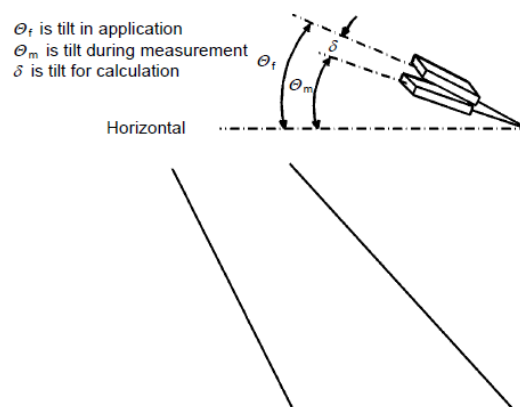


Figura 3. 7 Inclinación durante la medición, inclinación en la aplicación, inclinación para el cálculo.

Fuente: CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

3.3.7 REQUISITOS PARA LOS DATOS FOTOMÉTRICOS [20].

3.3.7.1 DATOS DE INTENSIDAD LUMINOSA DE LAS LUMINARIAS

Para los cálculos a realizar se requiere una tabla de intensidad luminosa, Anexo 3.1. El sistema de coordenadas utilizado para las luminarias de alumbrado público como explicamos anteriormente es generalmente el (C, γ) , que se muestra en la Figura 3.8. La intensidad luminosa es expresada en candelas por kilolumen (cd/klm).

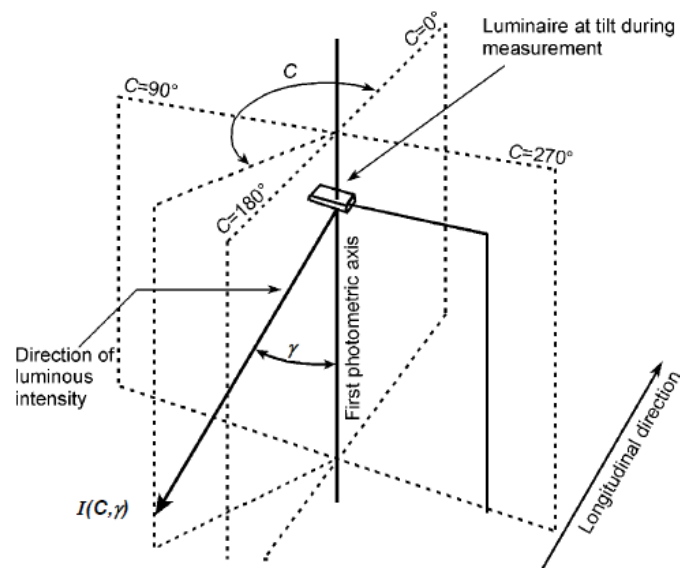


Figura 3. 8 Sistema de coordenadas C, γ

Fuente: CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

Los valores de los flujos e intensidades luminosas se requieren en la gama de ángulos que son importantes. “En particular, se precisan valores hasta el ángulo máximo de elevación que es relevante para la aplicación prevista de la luminaria, teniendo en cuenta el ángulo máximo de inclinación de la luminaria. Los intervalos angulares determinados han sido seleccionados para dar niveles aceptables de error de interpolación cuando se usan los procedimientos de interpolación recomendados” [20].

Para el sistema de coordenadas (C, γ), se requerirán intensidades luminosas en los intervalos angulares indicados a continuación.

“Para todas las luminarias, los intervalos angulares de elevación (γ) deben ser como máximo $2,5^\circ$ de 0° a 90° más el ángulo de elevación máximo admisible del campo menos el ángulo de elevación de medición para la luminaria” [20].

En azimut, los intervalos se pueden variar de acuerdo con la simetría de la distribución de luz desde la luminaria de la siguiente manera: [20]

- a) Luminarias sin simetría alrededor del plano $C = 0^\circ - 180^\circ$: los intervalos deben ser como máximo de 5° , comenzando en 0° , cuando la luminaria está en su ángulo de medición de elevación y termina en 355° ;
- b) Las luminarias con simetría nominal alrededor del plano $C = 90^\circ - 270^\circ$: los intervalos deben ser como máximo de 5° , comenzando en 270° , cuando la luminaria está en su inclinación durante la medición y termina en 90° ;
- c) Luminarias con la misma distribución de luz en todos los planos C : solo se necesita un conjunto representativo de medidas en elevación.

3.3.7.2 INTERPOLACIÓN DE DATOS DE INTENSIDAD LUMINOSA

Una interpolación es necesaria cuando requerimos una intensidad luminosa en una dirección que se encuentre entre las direcciones en las que se toman las mediciones, como se muestra en la Figura 3.9, donde se requiere la intensidad luminosa $I(C, \gamma)$ es necesario interpolar entre los cuatro valores de intensidad más cercanos a la dirección C, γ .

Para obtener el valor de intensidad luminosa se puede utilizar una interpolación lineal o cuadrática, o un procedimiento matemático más preciso; esto dependerá de la distancia angular de las mediciones de intensidad.

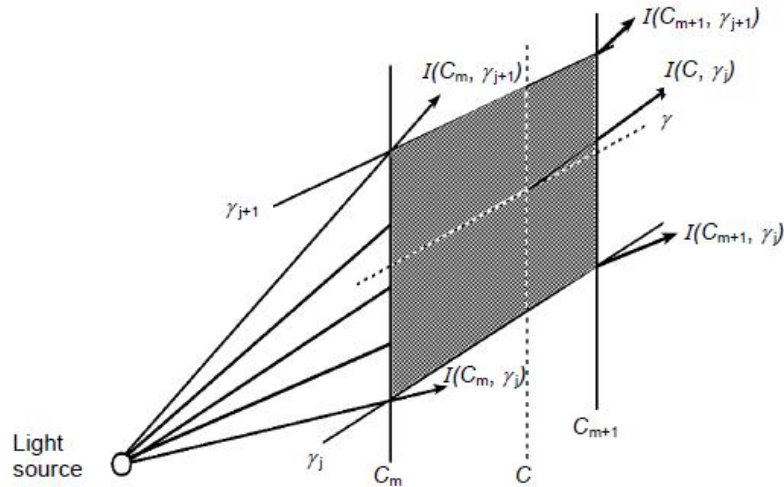


Figura 3. 9 Requerimientos para interpolación lineal de intensidad luminosa.

Fuente: CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

3.3.7.3 INTERPOLACIÓN LINEAL

Para estimar la intensidad $I(C, \gamma)$ es necesario interpolar entre los cuatro valores de intensidad más cercanos a la dirección (C, γ) como se indica en la Figura 3.10

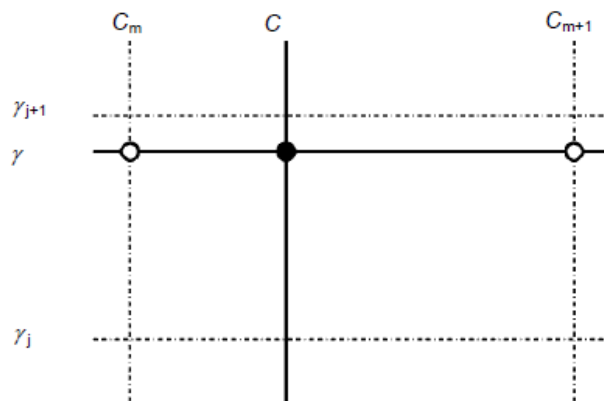


Figura 3. 10 Ángulos requeridos para la interpolación lineal de intensidad luminosa.

Fuente: CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

Para la interpolación lineal con $n = 2$ tenemos:

$$y(x) = y_1 \left(\frac{x - x_2}{x_1 - x_2} \right) + y_2 \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right)$$

Esta ecuación se puede aplicar primero para C o γ . Cuando se aplica por primera vez a C, C se sustituye por x:

$$\begin{aligned}x &= C \\x_1 &= C_m \\x_2 &= C_{m+1}\end{aligned}$$

A partir de esta sustitución pueden definirse dos constantes (K_1 y K_2):

$$\begin{aligned}K_1 &= \left(\frac{C - C_{m+1}}{C_m - C_{m+1}} \right) \\K_2 &= \left(\frac{C - C_m}{C_{m+1} - C_m} \right)\end{aligned}$$

Puesto que $K_1 + K_2 = 1$, la notación puede simplificarse poniendo $K = K_1$ para que $K_2 = 1 - K$. Sustituyendo estas constantes y valores apropiados de I por γ en la ecuación de Lagrange tenemos:

$$I(C, \gamma_j) = I(C_m, \gamma_j) + K \cdot [I(C_{m+1}, \gamma_j) - I(C_m, \gamma_j)]$$

Similar,

$$I(C, \gamma_{j+1}) = I(C_m, \gamma_{j+1}) + K \cdot [I(C_{m+1}, \gamma_{j+1}) - I(C_m, \gamma_{j+1})]$$

Para la interpolación con un valor C constante, tenemos:

$$I(C, \gamma) = I(C, \gamma_j) + k \cdot [I(C, \gamma_{j+1}) - I(C, \gamma_j)]$$

Donde,

$$k = \frac{\gamma - \gamma_j}{\gamma_{j+1} - \gamma_j}$$

Si primero realizamos la interpolación de γ seguido de C, se obtendrá el mismo resultado. Cuando se utilice la interpolación lineal con intervalos angulares grandes, habrá cierta pérdida de precisión y se recomendará una interpolación cuadrática.

3.3.7.4 INTERPOLACIÓN CUADRÁTICA

Para interpolación cuadrática requerimos tres valores de intensidad para cada valor interpolado, como se indica en la Figura 3.11. Si se requiere un valor de I en (C, γ) , la interpolación se realiza primero por tres columnas adyacentes que encierran el punto. Esto permite que se encuentren tres valores de I en γ .

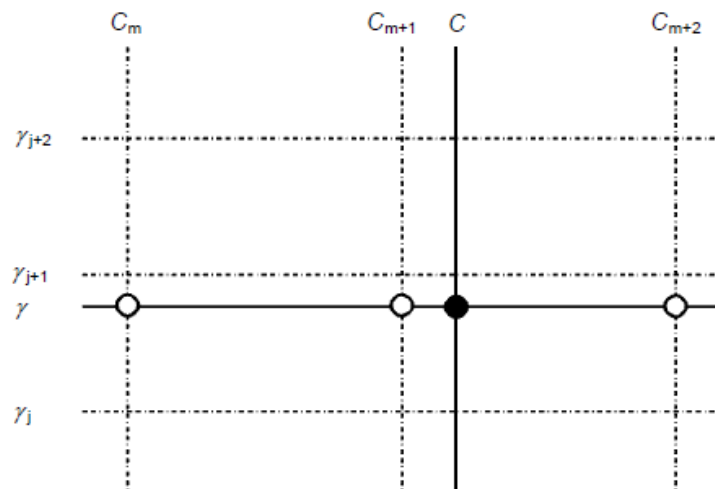


Figura 3. 11 Valores requeridos para interpolación cuadrática.

Fuente: CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

Para reducir errores de interpolación, se deben seguir las siguientes dos reglas al seleccionar los valores para la inserción en las ecuaciones de interpolación:

- 1) “Se seleccionan los dos ángulos tabulares adyacentes al ángulo de interpolación para su inserción en las ecuaciones de interpolación y se calcula el promedio” [20].
- 2) Si el ángulo de interpolación es menor que este promedio, entonces, el tercer ángulo tabular es el siguiente inferior (como se muestra en la Figura 3.11); si el ángulo de interpolación es mayor que este promedio, entonces, el tercer ángulo tabular es el siguiente más alto (como se muestra para γ en la Figura 3.11).

La fórmula para la interpolación cuadrática se obtiene poniendo $n = 3$ en la ecuación de Lagrange, que da:

$$y(x) = y_1 \left[\frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} \right] + y_2 \left[\frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} \right] + y_3 \left[\frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)} \right]$$

Como para la interpolación lineal, esta interpolación puede aplicarse a C o γ . Cuando se aplica primero a C , C se sustituye por x :

$$x = C$$

$$x_1 = C_m$$

$$x_2 = C_{m+1}$$

$$x_3 = C_{m+2}$$

Dónde:

C es el ángulo en el que I se encuentra por interpolación;

$m, m + 1, m + 2$ son números enteros que indican el número de columnas;

C_m, C_{m+1} y C_{m+2} son valores de C para los números de columna correspondientes.

A partir de esta sustitución pueden definirse tres constantes:

$$K_1 = \frac{(C - C_{m+1})(C - C_{m+2})}{(C_m - C_{m+1})(C_m - C_{m+2})}$$

$$K_2 = \frac{(C - C_m)(C - C_{m+2})}{(C_{m+1} - C_m)(C_{m+1} - C_{m+2})}$$

$$K_3 = \frac{(C - C_m)(C - C_{m+1})}{(C_{m+2} - C_m)(C_{m+2} - C_{m+1})}$$

De estas tres ecuaciones se deduce que $K_1 + K_2 + K_3 = 1$. Sustituyendo estas constantes y valores apropiados de I por γ en la ecuación de Lagrange tenemos:

$$I(C, \gamma_j) = K_1 \cdot I(C_m, \gamma_j) + K_2 \cdot I(C_{m+1}, \gamma_j) + K_3 \cdot I(C_{m+2}, \gamma_j)$$

$$I(C, \gamma_{j+1}) = K_1 \cdot I(C_m, \gamma_{j+1}) + K_2 \cdot I(C_{m+1}, \gamma_{j+1}) + K_3 \cdot I(C_{m+2}, \gamma_{j+1})$$

$$I(C, \gamma_{j+2}) = K_1 \cdot I(C_m, \gamma_{j+2}) + K_2 \cdot I(C_{m+1}, \gamma_{j+2}) + K_3 \cdot I(C_{m+2}, \gamma_{j+2})$$

Para la interpolación de los ángulos γ , la aplicación adicional de la ecuación de Lagrange, da tres nuevas constantes:

$$k_1 = \frac{(\gamma - \gamma_{j+1})(\gamma - \gamma_{j+2})}{(\gamma_j - \gamma_{j+1})(\gamma_j - \gamma_{j+2})}$$
$$k_2 = \frac{(\gamma - \gamma_j)(\gamma - \gamma_{j+2})}{(\gamma_{j+1} - \gamma_j)(\gamma_{j+1} - \gamma_{j+2})}$$
$$k_3 = \frac{(\gamma - \gamma_j)(\gamma - \gamma_{j+1})}{(\gamma_{j+2} - \gamma_j)(\gamma_{j+2} - \gamma_{j+1})}$$

De estas tres ecuaciones se deduce que $k_1 + k_2 + k_3 = 1$, y:

$$I(C, \gamma) = k_1 \cdot I(C, \gamma_j) + k_2 \cdot I(C, \gamma_{j+1}) + k_3 \cdot I(C, \gamma_{j+2})$$

Que nos da el valor requerido de intensidad luminosa.

Se obtendrá el mismo resultado si primero realizamos la interpolación de γ seguido de C .

3.3.8 CÁLCULO DE $I(C, \gamma)$.

“Para determinar la intensidad luminosa dirigida desde una luminaria a un punto, es necesario encontrar el ángulo fotométrico vertical (γ) y el azimut fotométrico (C) de la trayectoria de la luz hasta el punto. Para hacer esto, debe tenerse en cuenta la orientación, la inclinación en la aplicación y la rotación de la luminaria” [20].

3.3.8.1 CÁLCULO DE C : LUMINARIA NO GIRADA ALREDEDOR DE EJES FOTOMÉTRICOS

De la Figura 3.8.

$$C = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

Que dará:

$$-90^{\circ} \leq \tan^{-1} \frac{y}{x} \leq 90^{\circ}$$

El cuadrante angular en el que se encuentra se determina a partir de la Tabla 3.1

Tabla 3. 1 Cálculo de C para x e y.

x	y	C (grados)	Rango de C (grados)
> 0	> 0	$\tan^{-1} \frac{y}{x}$	$0 \leq C \leq 90$
< 0	> 0	$180 + \tan^{-1} \frac{y}{x}$	$90 \leq C \leq 180$
> 0	< 0	$180 + \tan^{-1} \frac{y}{x}$	$180 \leq C \leq 270$
< 0	< 0	$360 + \tan^{-1} \frac{y}{x}$	$270 \leq C \leq 360$

Fuente: Autor, CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

3.3.8.2 CÁLCULO DE γ : LUMINARIA NO GIRADA ALREDEDOR DE EJES FOTOMÉTRICOS

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{H}$$

Donde:

$$0^{\circ} \leq \gamma \leq 90^{\circ}$$

3.3.8.3 CÁLCULO DE C Y γ : LUMINARIA GIRADA ALREDEDOR DE EJES FOTOMÉTRICOS.

Estos se determinan en tres etapas:

1) Sustitución de v , ψ , δ , x e y en las ecuaciones:

$$x' = x(\cos v \cdot \cos \psi - \sin v \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi) + y(\sin v \cdot \cos \psi + \cos v \cdot \sin \delta \cdot \sin \psi) + H \cdot \cos \delta \cdot \sin \psi$$

$$y' = -x \cdot \sin v \cdot \cos \delta + y \cdot \cos v \cdot \cos \delta - H \cdot \sin \delta$$

$$H' = -x(\sin v \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi + \cos v \cdot \sin \psi) - y(\sin v \cdot \sin \psi - \cos v \cdot \sin \delta \cdot \cos \psi) + H \cdot \cos \delta \cdot \cos \psi$$

Dónde:

x e y son las distancias longitudinales y transversales entre el punto de cálculo y el nadir de la luminaria como se indica en la Figura 3.5.

H es la altura de la luminaria por encima del punto de cálculo;

v, δ y ψ son la orientación, la inclinación en la aplicación y la rotación;

x', y', y H' son distancias en el sistema de coordenadas que ha sido dado vuelta a δ ,

v, y ψ . Corresponden a x, y, y H en el sistema de coordenadas sin mover y para fines de cálculo pueden considerarse simplemente como variables intermedias.

2) Cálculo de C

La evaluación de $\tan^{-1} \frac{y'}{x'}$ dará

$$-90^\circ \leq \tan^{-1} \frac{y'}{x'} \leq 90^\circ$$

El cuadrante angular en el que se encuentra se determina a partir de la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2 Cálculo de C para x' e y'.

x'	y'	C (grados)	Rango de C (grados)
> 0	> 0	$\tan^{-1} \frac{y'}{x'}$	$0 \leq C \leq 90$
< 0	> 0	$180 + \tan^{-1} \frac{y'}{x'}$	$90 \leq C \leq 180$
> 0	< 0	$180 + \tan^{-1} \frac{y'}{x'}$	$180 \leq C \leq 270$
< 0	< 0	$360 + \tan^{-1} \frac{y'}{x'}$	$270 \leq C \leq 360$

Fuente: Autor, CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

3) Cálculo de γ

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{H'}$$

Que dará:

$$-90^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ$$

El cuadrante angular en el que se encuentra se determina a partir de la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3 Cálculo de γ .

H'	γ (grados)	Rango de γ (grados)
> 0	$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{H'}$	$0 \geq \gamma < 90$
0	90	90
< 0	$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sqrt{x'^2 + y'^2}}{H'} + 180$	$90 > \gamma \leq 180$

Fuente: Autor, CIE 140-2000 Comisión Internacional de Iluminación, Road Lighting Calculations

3.3.9 MEDICIONES DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA INTENSIDAD LUMINOSA

“En la fotometría de luminarias, se usa un goniofotómetro principalmente para medir la intensidad de la luminaria es direcciones seleccionadas. Las mediciones pueden usarse para deducir características fotométricas o puede transformarse para editarlas gráficamente, como una curva polar” [19].

3.3.9.1 MEDICIÓN DE LUMINARIAS

3.3.9.1.1 MONTAJE

“Las luminarias deben montarse sobre el goniofotómetro en su posición de diseño. Su centro fotométrico debe coincidir con el centro de rotación del goniofotómetro. Su orientación debe corregirse con respecto a la escala azimutal del goniofotómetro y con respecto a la referencia azimutal de la luminaria” [19].

3.3.9.1.1.2 MEDICIÓN

“A menos que se especifique lo contrario, debe aplicarse el sistema de coordenadas C, γ . El número de lecturas de intensidad en diferentes planos verticales y el espacio angular entre los puntos de medición debe ser tal que permita la interpolación de valores de intensidad durante los cálculos de luz con una precisión aceptable. El número de planos debe determinarse por naturaleza de la distribución teniendo en cuenta la simetría o la irregularidad y los resultados finales deseados a partir de los ensayos, y de forma notable por la precisión necesaria para cualquier cálculo de iluminación subsecuente” [19].

Debido a las pequeñas variaciones de los componentes ópticos, las luminarias diseñadas con distribución simétrica deben medirse siempre en los dos semiplanos de simetría.

3.3.9.1.1.3 MEDICIÓN DE POLARIZACIÓN

“Para la medición del porcentaje de polarización (típicamente polarización vertical) de la luz procedente de una luminaria en una dirección dada, deben proporcionarse los medios que hagan que la cabeza del fotómetro responda tanto a la luz polarizada horizontalmente como a la polarizada verticalmente. Debido a que los polarizadores tienen unas características de absorción de luz apreciables, es necesario medir tanto la componente horizontal como la vertical de polarización para obtener el porcentaje de luz polarizada en cada plano” [19].

La presencia de un espejo en el goniofotómetro puede introducir errores en las mediciones de polarización debido a las características de polarización del propio espejo.

3.3.9.2 MONTAJE

“La lámpara desnuda debe montarse en la orientación para la que fue diseñada. Las lámparas del tipo diseñado para montaje universal pueden montarse en cualquier posición siempre y cuando los datos fotométricos de la lámpara

disponible se relacionen con la posición escogida, que debe, preferiblemente, ser la misma posición que la posición de funcionamiento en la luminaria” [19].

El centro de luz (centro fotométrico) de la lámpara debe estar en el centro efectivo de rotación del goniofotómetro y la lámpara debe estar correctamente alineada.

3.3.9.2.1 MEDICIÓN

“Las mediciones de intensidad de las lámparas desnudas se hacen para calibrar la cabeza del fotómetro o para calcular el flujo luminoso de la lámpara desnuda. Las mediciones de las lámparas desnudas deben realizarse preferiblemente justo antes, o inmediatamente después, de la medición de la luminaria. Las mediciones de la intensidad deben hacerse en las mismas unidades que la medición de la luminaria” [19].

La medición de la distribución de la intensidad de la lámpara puede realizarse mediante:

a) Medición completa

“Las lecturas de la intensidad deben tenerse en cuenta en varias direcciones. El procedimiento es análogo al utilizado para la medición de la luminaria” [19].

b) Método simplificado

“Este método necesita una lámpara previamente calibrada. La mayoría de las lámparas si se manejan cuidadosamente mantienen una razón casi constante del flujo luminoso A para la intensidad luminosa B en la dirección escogida. Esta razón puede establecerse durante una medición completa como el anterior punto (a). En mediciones subsecuentes, sólo se mide la intensidad C en la dirección escogida” [19].

El flujo luminoso Φ de la lámpara puede obtenerse después a partir de la expresión:

$$\Phi = C \cdot A/B$$

Es recomendable tanto para A como B se midan en dos direcciones y que se calcule el valor medio. “Las direcciones escogidas deben ser aquellas en que la intensidad proveniente de la lámpara esté próxima a la máxima pero donde la intensidad no cambie rápidamente con la dirección” [19].

“Las mediciones se hacen normalmente a 90° del eje de la lámpara, en lados opuestos. Si la intensidad de la lámpara cambia rápidamente con la dirección, deben tomarse varias lecturas y promediarlas. El factor A/B debe verificarse regularmente para todas las lámparas excepto para lámparas fluorescentes tubulares. Este método no se recomienda para lámparas de bulbo transparente” [19].

c) Luminarias con varias lámparas

“En el caso de luminarias con varias lámparas, será necesario repetir la medición para cada lámpara separadamente (cuando sea pertinente, cada una con su balasto apropiado). Todas las lámparas que funcionan con un único balasto deben funcionar durante la medición en las mismas condiciones de temperatura ambiente” [19].

3.3.10 MEDICIONES DEL FLUJO LUMINOSO DE LUMINARIAS

“En la fotometría de luminarias, las mediciones del flujo luminoso son necesarias para determinar el Factor de salida luminosa, el flujo luminoso total, o el flujo hacia arriba o hacia abajo, y los flujos luminosos zonales de la luminaria. Las mediciones de flujo luminoso sobre la(s) lámpara(s) desnuda(s) permiten que las características de salida de la luminaria se exprese por 1000 lm de flujo de lámpara” [19].

3.3.10.1 MÉTODO DE INTEGRACIÓN DE INTENSIDAD

“Este método se aplica necesariamente para el cómputo de flujos zonales o los flujos totales hacia arriba o hacia abajo. El flujo luminoso se determina a partir de un número de lecturas de intensidad y se calcula por medio de un procedimiento adecuado como por ejemplo cálculos directos, ángulos de Russell, factores zonales, etc” [19].

3.3.10.1.1 CALIBRACIÓN RELATIVA DEL GONIOFOTÓMETRO

“El cálculo de flujo luminoso de la lámpara desnuda mediante el método de integración de intensidad permite la conversión de las mediciones de la distribución de la intensidad, realizadas sobre la luminaria en unidades de escala arbitrarias a candelas por 1000 lm de flujo de lámpara a partir de la lámpara desnuda, suponiendo que la lámpara se ha medido en las mismas unidades de escala arbitrarias” [19].

El principio en el que se basa este método relativo de calibración es el siguiente.

La intensidad luminosa $I_{C,\gamma}$ de la luminaria en una dirección dada C, γ relacionada con un flujo luminoso de 1000 lm proveniente de la lámpara viene dado por:

$$I_{C,\gamma} = k R_{C,\gamma} \cdot 1000/\Phi$$

Donde

$R_{C,\gamma}$ es la lectura en unidades de escala arbitraria sobre el fotómetro,

k es un factor de escala constante

Φ es el flujo luminoso de la(s) lámpara(s)

Si la lámpara se mide en las mismas unidades de escala arbitraria sobre el fotómetro, el flujo luminoso de la lámpara viene dado por

$$\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi I_{C,\gamma} \sin\gamma \, d\varphi dC = k \int_0^{2\pi} \int_0^\pi R_{C,\gamma} \sin\gamma \, d\varphi dC = k\Phi_R$$

Donde

Φ_R es el flujo luminoso relativo calculado a partir de las lecturas en las unidades de escala arbitraria.

Por lo tanto, podemos expresar que:

$$I_{C,\gamma} = k R_{C,\gamma} \cdot 1000 / k \Phi_R = R_{C,\gamma} \cdot 1000 / \Phi_R$$

Ya que se ha eliminado de la formula el factor de escala k , la medición puede llevarse a cabo completamente en unidades de escala arbitraria.

3.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

En el siguiente apartado se muestra el modelo de análisis a utilizar para determinar el flujo luminoso incidente sobre el área de las fachadas de las edificaciones adyacentes, la cantidad de luz y energía no necesaria consumida por el alumbrado público.

En base a los datos de distribución de intensidad luminosa, se procede a realizar un ajuste polinómico para obtener una ecuación aproximada de las curvas que forman el sólido de distribución luminosa de la luminaria. Una vez obtenidas estas ecuaciones, se procede a integrar entre los límites de ángulo γ , obteniendo así el área bajo la curva y por ende el valor de la intensidad luminosa que da sobre las fachadas de las edificaciones adyacentes a la luminaria.

3.4.1 DATOS DE DISTRIBUCIÓN DE INTENSIDAD LUMINOSO

Los datos de distribución de intensidad luminosa, Anexo 3.1, son representados en un sistema de tres coordenadas donde I representa el valor de la intensidad luminosa en candela e indica la longitud del vector mientras que C e γ señalan la dirección, el ángulo C indica el plano vertical e γ mide la inclinación respecto al eje vertical de la luminaria.

Para las luminarias los valores de C comprendidos entre los ángulos de 0° y 180° caen sobre la calzada mientras que los valores comprendidos entre los ángulos de 180° y 360° caen sobre la acera y no serán considerados en el análisis.

Las curvas de distribución luminosa nos dan información de lo que ocurre en unos pocos planos para algunos de los valores de C, no se sabe con exactitud qué pasa en el resto; para evitar estos inconvenientes tenemos las curvas isocandelas que son curvas que resultan de la unión de puntos de igual intensidad luminosa.

Para obtener la ecuación de las curvas de distribución luminosa lo realizamos mediante:

3.4.1.1 AJUSTE POLIMÓNIMO EN MATLAB

Dados N puntos (x(i), y(i)) se puede obtener un polinomio de orden N-1 que pasa por todos los puntos. En Matlab este polinomio se puede obtener usando el comando `polyfit(x,y,N-1)`.

- `p = polyfit(x,y,n)`

Encuentra los coeficientes de un polinomio $p(x)$ de grado n que se ajusta a los datos, $p(x(i))$ a $y(i)$, en un sentido de mínimos cuadrados. El resultado p es un vector de fila de longitud $n+1$ contiene los coeficientes polinomiales en potencias descendentes.

$$p(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_1x + p_{n+1}$$

- `[p,S] = polyfit(x,y,n)`

Devuelve los coeficientes polinomiales p y una estructura S para usar con `polyval` para obtener estimaciones o predicciones de errores. Si los errores en los datos y son independientes, normales con varianza constante, `polyval` produce límites de error que contienen al menos el 50% de las predicciones.

3.4.1.2 LÍNEAS DE TENDENCIAS POLINOMICAS

Las líneas de tendencia se usan para mostrar de forma gráfica las tendencias de los datos y para ayudar a analizar los problemas de las previsiones. Este tipo de análisis también se denomina análisis de regresión. Mediante el análisis de regresión, se puede extender una línea de tendencia en un gráfico más allá de los datos en sí para prever los valores futuros. Una línea de tendencia es más precisa cuando su valor R cuadrado es 1 o se aproxima a 1.

3.4.1.2.1 LÍNEAS DE TENDENCIA POLINÓMICAS

Una línea de tendencia polinómica es una línea curva que se usa cuando hay fluctuaciones de datos. Es útil, por ejemplo, para analizar ganancias y pérdidas en un gran conjunto de datos. El orden del polinomio se puede determinar por la cantidad de fluctuaciones en los datos o por la cantidad de ajustes (máximos y mínimos) que aparecen en la curva. Una línea de tendencia polinómica de segundo orden solamente suele poseer un máximo o mínimo. Una línea de tendencia polinómica de tercer orden generalmente posee uno o dos máximos o mínimos. Una línea de tendencia de cuarto orden generalmente posee hasta tres máximos o mínimos.

3.5 VARIABLES DE ESTUDIO

En este punto se plantean las variables a considerar para la obtención de datos previo al análisis de los datos fotométricos de la luminaria. Las variables más importantes a tomarse en cuenta son:

- Tipo de luminaria según su simetría de distribución.
- Disposición de diseño y medición de la luminaria.
- Altura de montaje de la luminaria.
- Distribución de la intensidad luminosa.
- Condiciones de referencia.

CAPÍTULO 4

4. LEVANTAMIENTO DE DATOS DE POLUCIÓN LUMÍNICA

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo describe los modelos de luminarias utilizadas en el alumbrado público del Centro Histórico de la ciudad de Cuenca con sus respectivas características fotométricas y su disposición en las vías.

Posteriormente se mencionarán algunos datos que son necesarios tener presentes para los cálculos de las magnitudes luminosas, así como la información proporcionada por parte de la Empresa Eléctrica regional CENTROSUR sobre los datos fotométricos de dichas luminarias.

4.2 LUMINARIAS UTILIZADAS EN EL ALUMBRADO PÚBLICO DEL CENTRO HISTORICO DE CUENCA

“El Centro Histórico de la ciudad de Cuenca consta de 147 manzanas en cuyas calles se encuentran implementadas 1252 luminarias de vapor de sodio de alta presión siendo más del 90%, lámparas de 250 W de doble nivel de potencia” [21].

“Las luminarias utilizadas para el alumbrado público son de distribución del flujo luminoso asimétrico y son generalmente del tipo Semi Cut Off; esto es, suprimen los rayos luminosos emitidos por encima de un Angulo de 80°- 85° respecto de la vertical” [22].

4.2.1 INTI (General Public Lighting) 250 W

“Es una luminaria para Alumbrado Público diseñada para operar con lámparas de Sodio Alta Presión de 250 W. De gran robustez mecánica, conjuga su alto grado de hermeticidad con su fotometría de gran rendimiento; la cual la hace

apropiada para aplicaciones en alumbrado de vías públicas y áreas exteriores en general” [23]. La luminaria INTI 250 W posee un flujo total de 33.200 lm.



Figura 4. 1 Luminaria INTI

Fuente: <http://imagenes.search.yahoo.com>

4.2.1.1 CARACTERÍSTICAS

4.2.1.1.1 CUERPO

“De aluminio inyectado a presión, compuesta por dos piezas consistente en la tapa superior en la cual está el reflector y el marco inferior en el cual se aloja el equipo eléctrico y el refractor” [23].

4.2.1.1.2 REFLECTOR

“De aluminio embutido de alta pureza, electro abrillantado y oxidado anódicamente (anodizado)” [23].

4.2.1.1.3 REFRACTOR

“Está fabricado de vidrio templado, de diseño curvo liso para la obtención de un gran rendimiento luminoso y muy baja contaminación lumínica, de alta resistencia al impacto” [23].

4.2.1.1.4 HERMETICIDAD

La carcasa garantiza los siguientes grados de hermeticidad o protección:

IP 66 para el conjunto eléctrico

IP 66 para el conjunto óptico

4.2.2 LUMINARIAS ONYX 2

Luminaria de alumbrado público Sealsafe (IP 66) compuesta por dos piezas de aleación de aluminio articuladas entre ellas en uno de los lados mediante dos bisagras y provistas de un sistema de cierre de acero inoxidable, una placa de auxiliares eléctricos desmontable, un sistema de fijación para entrada lateral (60 mm), un bloque óptico formado por un protector de vidrio curvo y templado.

La luminaria tipo ONYX 2 de 250 W posee un %FHS de 0.8.

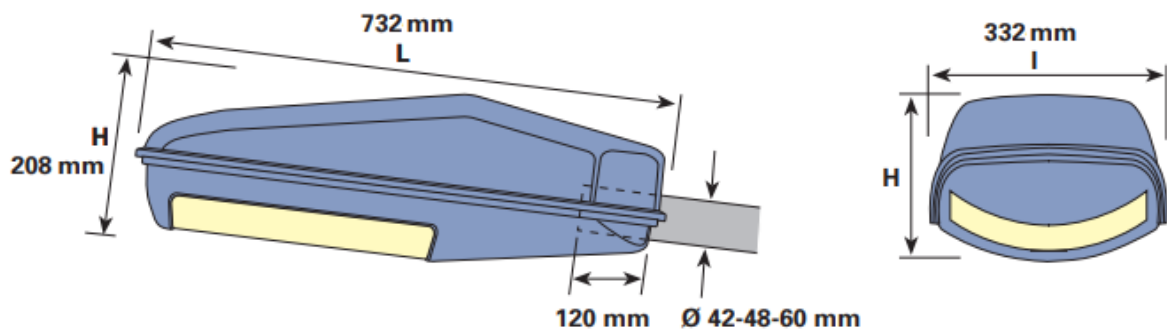


Figura 4. 2 Dimensiones y fijación de luminaria Onyx 2.

Fuente: <http://imagenes.search.yahoo.com>

4.2.2.1 FOTOMETRÍA

4.2.2.1.1 DISTRIBUCIÓN FOTOMÉTRICA CONTROLADA

El protector de vidrio curvado permite un excelente control del flujo luminoso, que reduce al mínimo el resplandor luminoso y por ende la contaminación lumínica. El protector curvado permite rebajar suficientemente la posición de la lámpara de modo que se evite el “efecto flash” típico de los vidrios planos. De ello resulta una distribución fotométrica ligeramente más extensiva, lo que permite una mayor distancia entre puntos de luz.

4.2.2.1.2 PROTECTOR DE VIDRIO

La gama Onyx está equipada con protectores de vidrio templado con una transparencia de por lo menos un 96%, esto permite que la luminaria con el tiempo no se amarillee bajo la acción de los rayos ultravioleta, no acumule polvo

gracias a su insensibilidad al fenómeno electrostático y su propiedad autolimpiante bajo la acción de la lluvia.

4.2.2.1.3 AJUSTE DE LA LÁMPARA

El portalámparas va fijado a un soporte en el interior del obturador. Tiene veintiuna posiciones posibles. Esta flexibilidad permite adaptar la distribución fotométrica a las exigencias del lugar a iluminar (anchura de la vía, altura de instalación, etc.).

4.2.2.1.4 FOTOMETRÍA ÓPTIMA DE LARGA DURACIÓN

Las cualidades del vidrio combinadas con las ventajas del sistema Sealsafe garantizan a la gama Onyx la constancia de las prestaciones fotométricas optimizadas durante mucho tiempo. La pérdida luminosa es realmente mínima.

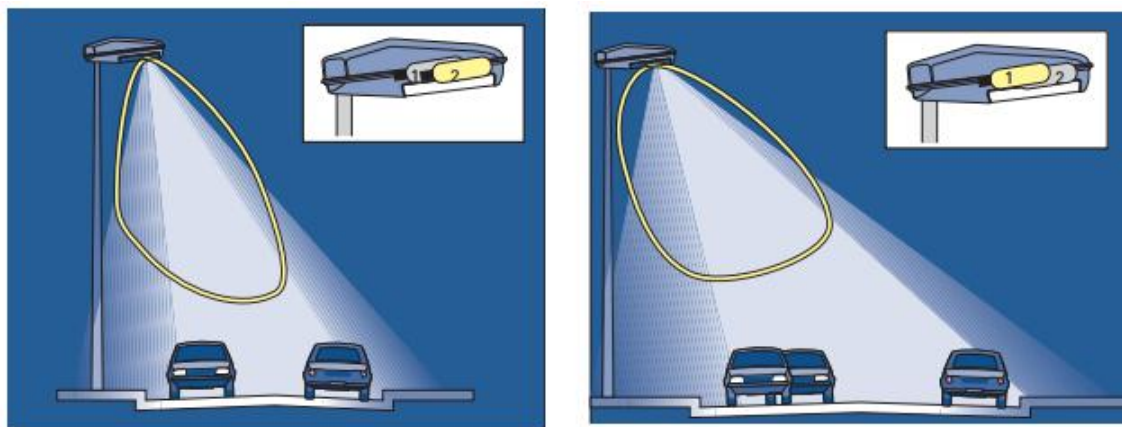


Figura 4. 3 (i) Lámpara en posición adelantada para una reducida anchura de la vía ($L=0,8$ h), (ii) Lámpara de posición alejada para una mayor anchura de la vía ($L=1.5$ h).

Fuente: <http://imagenes.search.yahoo.com>

4.3 DISPOSICION DE LAS LUMINARIAS

El sistema de alumbrado público del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca posee únicamente una distribución (disposición) unilateral. Las luminarias tienen una fijación lateral a una altura de 8.5 m, valor que será considerado para los cálculos posteriores.

4.3.1 DISPOSICIÓN UNILATERAL

Según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Es una disposición donde todas las luminarias se instalan a un solo lado de la vía. El diseñador debe utilizar la luminaria más apropiada que cumpla con los requisitos fotométricos exigidos para las alturas de montaje, interdistancia y menor potencia eléctrica requerida” [3].

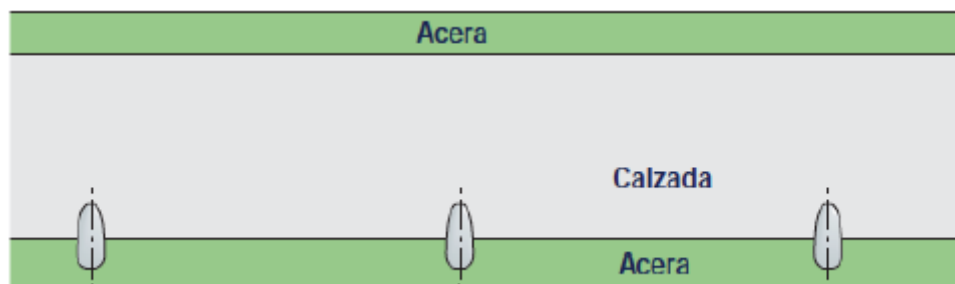


Figura 4. 4 Disposición unilateral de luminarias.

Fuente: Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069

4.4 ANCHO DE LAS VÍAS [21]

Para determinar el área del sólido de distribución de intensidad luminosa de las luminarias empleadas en el alumbrado público que afectan a las viviendas adyacentes, es necesario conocer el ancho de las vías del Centro Histórico de la ciudad de Cuenca, en base a las muestras tomadas en la tesis “Eficiencia energética en el alumbrado público del Centro Histórico de Cuenca: Telegestión y sustitución de luminarias” tenemos que:

- Acera: Promedio 1.98 m, Mínimo 1.27 m.
- Calzada: Promedio: 7.38 m, Mínimo 5.50 m.
- Factor de mantenimiento: No existe un ciclo de mantenimiento preventivo por lo que se considera uniformidad en todo el sector.

Para los análisis a realizar del presente trabajo se tomaran valores de 8 m, para el ancho de la calzada; mientras que de las aceras serán de 1.5 m.

4.5 FLUJO HEMISFERIO SUPERIOR

El Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público” define al Flujo de Hemisferio Superior como “el flujo luminoso emitido por el equipo de iluminación (luminaria y lámpara) por encima del plano horizontal. Dicho plano corresponde al ángulo $\gamma = 90^\circ$ en el sistema de representación (C, γ). El flujo hemisférico se expresa como un porcentaje del flujo total emitido por la luminaria” [3].

En la Tabla 4.1 podemos encontrar la cantidad máxima permitida de emisión lumínica hacia los cielos nocturnos, medida en el afluyente de la fuente emisora según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 069 “Alumbrado Público”.

Tabla 4. 1 Cantidad máxima permitida de emisión lumínica hacia los cielos nocturnos.

<i>Flujo luminoso de la fuente</i>	<i>Límites de FHS</i>
Flujo luminoso > 15.000 lúmenes	FHS $\leq 0.8\%$ del flujo luminoso nominal
9.000 lúmenes < Flujo luminoso ≤ 15.000 lúmenes	FHS $\leq 1.8\%$ del flujo luminoso nominal
Flujo luminoso ≤ 9.000 lúmenes	FHS $\leq 5.0\%$ del flujo luminoso nominal

Fuente: REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INENE 069 “Alumbrado Público”. (2013)

4.6 LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

La información utilizada para el desarrollo del trabajo constara básicamente de los datos de fotométricos de las luminarias a analizar, contaremos con las matriz de datos de distribución de intensidad luminosa (C, γ) con la que posteriormente se procederán a encontrar las ecuaciones de las curvas características del sólido de distribución en cada uno de los planos que afectan de manera directa a las fachadas de las viviendas adyacentes, dicha información será obtenida de datos de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR y se adjunta en el Anexo 3.1.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS DE DATOS RECOPIADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo con los datos previamente obtenidos se realizará la cuantificación de magnitudes luminosas necesarias, para lo cual se explicará detalladamente los procedimientos realizados y finalmente se presentarán los resultados obtenidos.

Para el ajuste polinomial de las líneas que forman el sólido de distribución luminosa se lo realizará mediante el comando polyfit de Matlab ya que éste nos permite obtener una mejor aproximación debido a que se puede tener un mayor número de términos del polinomio y por ende una curva más próxima a la real, reduciendo de esta manera el margen de error.

5.2 CONVENCIONES MATEMÁTICAS PARA LOS CÁLCULOS

- La altura de montaje de la luminaria es de 8,5 m.
- Inclinación de la luminaria de 15° .
- El ancho de la calzada será de 8 m.
- El ancho de la acera será de 1.5 m.
- Como es un requisito del sistema de alumbrado público permitir una buena visibilidad al peatón así como su seguridad, no se toma en consideración la luz que afecta por debajo de los 2 m de las fachadas de las viviendas adyacentes existentes.

En los datos fotométricos adquiridos podemos tener información de todos los planos pertenecientes a la luminaria. Sin embargo, hay algunos planos cuya intensidad luminosa no afecta a las fachadas de las viviendas por lo cual no serán considerados; el conjunto de planos a tener en cuenta están dentro de los siguientes valores calculados:

5.2.1 CÁLCULO DE C

Al tener una disposición unilateral en las luminarias, para el valor total de y tenemos:

$$y = \text{calzada} + \text{acera}$$
$$y = 8 \text{ m} + 1.5 \text{ m} = 9.5 \text{ m}$$

Mediante una aproximación en los diagramas de curvas isolux se puede ver que:

$$x = 5 \text{ m}$$

Calculamos el valor de C:

$$C = \tan^{-1} \frac{9.5}{5} = 62.24^\circ$$

De este resultado podemos decir que para el análisis se considerarán los planos de C que se encuentran entre los valores de 60° a 120° ya que la luminaria posee una distribución simétrica. Esto puede ser comprobado de igual manera en los diagramas de distribución luminosa, los cuales podemos encontrarlos en los Anexos.

5.2.2 CÁLCULO DE γ

Para determinar el ángulo de γ tenemos que:

$$x = 0$$
$$y = 9.5 \text{ (obtenido anteriormente)}$$

Para determinar el valor de H consideramos la altura de montaje de la luminaria y tomamos en cuenta el valor de altura permitida por los requisitos mencionados en el Capítulo 2.

$$H = 8.5 \text{ m} - 2 \text{ m} = 6.5 \text{ m}$$

Calculamos el valor de γ :

$$\gamma = \frac{\sqrt{9.5^2}}{6.5} = 55.6196^\circ$$

De este resultado podemos decir que para el análisis consideraremos los valores de γ que se encuentran entre los valores de 55° a 180° .

5.3 CÁLCULO DE INTENSIDAD LUMINOSA

Para el cálculo de la intensidad luminosa se realizará un ajuste polinómico para obtener una ecuación aproximada de las curvas que forman el sólido de distribución luminosa de la luminaria en los planos C que afectan a las viviendas adyacentes. Una vez obtenidas estas ecuaciones, se procede a integrar entre los límites de ángulo γ , obteniendo así el área bajo la curva y por ende el valor de la intensidad luminosa de la luminaria.

5.3.1 AJUSTE POLINÓMICO MEDIANTE MATLAB

5.3.1.1 LUMINARIA INTI (General Public Lighting) 250W

Los planos C a analizar serán los correspondientes a los ángulos de 67.5° , 90° y 112.5° ; los mismo cuyos valores de intensidad luminosa se encuentran en las tablas del Anexo 3.1. Como tenemos valores en coordenadas polares, iniciamos realizando una conversión a coordenadas rectangulares para posteriormente desarrollar el ajuste polinómico y así obtener las ecuaciones respectivas de cada plano:

5.3.1.1.1 PLANO C = 67.5°

Realizamos la programación de datos en Matlab, mediante el siguiente código:

```
x=[-1.40 -1.30 -1.28 -1.16 -1.03 -0.82 -0.61 -0.49 -0.38 -0.35 -0.34 -  
0.32 -0.30 -0.25 -0.17 -0.13 -0.09 -0.04 0 0.13 1.02 4.71 10.36 18.72  
34.05 62.06 95.07 115.05 123.79 141.06 170.43 195.04 224.77 260.32 295.74  
316.29 318.10];
```

```

y=[0 0.11 0.23 0.31 0.38 0.38 0.35 0.34 0.32 0.35 0.49 0.38 0.52 0.54
0.47 0.48 0.49 0.50 0.70 1.49 5.81 17.58 28.47 40.15 58.98 88.63 113.30
115.05 103.87 98.77 98.40 90.95 81.81 69.75 52.15 27.67 0];
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:')
p=polyfit(x,y,10)
xp=-2:5:320;
yp=polyval(p,xp);
plot(x,y,'ro')
hold on
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)

a=[-2 0 62.06 70];
b=[-2.856 0 88.63 99.97];
plot(a,b,'r','linewidth',1)
    
```

El cual nos dará como resultado los coeficientes del polinomio que se ajusta a la curva de distribución lumínica en ese plano.

El polinomio aproximado a los puntos es:

```

p =
-8.2e-14    3.0287e-11   -6.9298e-9    1.0137e-6   -93.5151e-6
5.1282e-3   -156.1156e-3    3.603    2.4875
    
```

Pudiendo expresar la ecuación de la forma:

$$\begin{aligned}
 & -8.2 \cdot 10^{-14}x^8 + 3.0287 \cdot 10^{-11}x^7 - 6.9298 \cdot 10^{-9}x^6 + 1.0137 \cdot 10^{-6}x^5 - 93.5151 \cdot 10^{-6}x^4 \\
 & + 5.1282 \cdot 10^{-3}x^3 - 156.1156 \cdot 10^{-3}x^2 + 3.603x + 2.4875
 \end{aligned}$$

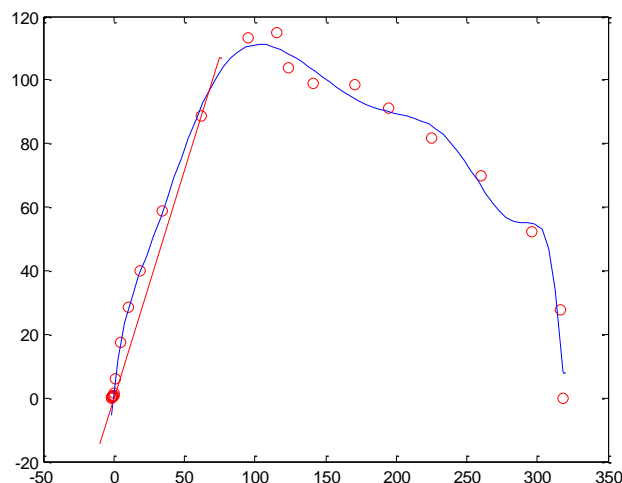


Figura 5. 1 Ajuste polinómico del plano C = 67.5°

Fuente: Simulación en Matlab

Como observamos en la Figura 5.1 el área que afecta a las viviendas adyacentes a la luminaria es la que se encuentra sobre el plano de los 55° y bajo la curva antes obtenida. Procedemos a integrar para los límites de y :

$$\int_{-1.40}^{62.06} -8.2 \cdot 10^{-14}x^8 + 3.0287 \cdot 10^{-11}x^7 - 6.9298 \cdot 10^{-9}x^6 + 1.0137 \cdot 10^{-6}x^5 - 93.5151 \cdot 10^{-6}x^4 + 5.1282 \cdot 10^{-3}x^3 - 156.1156 \cdot 10^{-3}x^2 + 3.603x + 2.4875 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 3305.0782 cd

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{62.06} 1.4281x \, dx = 2750.078 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 554.8893 cd

De igual manera procedemos a realizar para el resto de planos obteniendo:

5.3.1.1.2 PLANO C = 90°

```
x=[-1.3 -1.3 -1.28 -1.16 -1.03 -0.82 -0.61 -0.49 -0.38 -0.28 -0.32 -0.29  
-0.25 -0.21 -0.17 -0.10 -0.07 -0.03 0 0.1 0.63 1.81 4.48 10.44 20.95  
43.02 71.99 91.36 101.5 125.41 156.4 178.18 217.82 276.64 313.96 327.45  
318.1];  
y=[0 0.11 0.23 0.31 0.38 0.38 0.35 0.34 0.32 0.28 0.38 0.41 0.43 0.45  
0.47 0.39 0.39 0.4 0.5 1.2 3.55 6.76 12.31 22.39 36.29 61.44 85.8 91.36  
85.17 87.81 90.3 83.09 79.28 74.13 55.36 28.65 0];  
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:')  
p=polyfit(x,y,7)  
xp=-2:5:320;  
yp=polyval(p,xp);  
plot(x,y,'ro')  
hold on  
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)  
  
a=[-2 0 43.02 70];  
b=[-2.856 0 61.44 99.972];  
plot(a,b,'r','linewidth',1)
```

El polinomio aproximado a los puntos es:

```
p =  
3e-12    -3e-09    1e-06    -0.0001    -0.0053    1.8183    1.6088
```

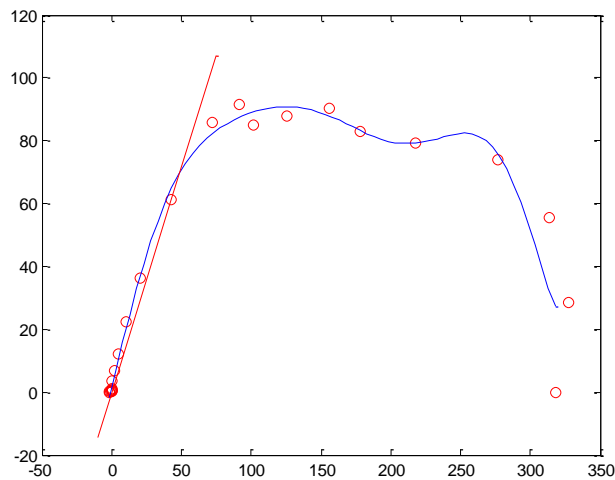


Figura 5. 2 Ajuste polinómico del plano C = 90°

Fuente: Simulación en Matlab

Expresamos la ecuación de la forma:

$$3 \cdot 10^{-12}x^6 - 3 \cdot 10^{-9}x^5 + 1 \cdot 10^{-6}x^4 - 0.0001x^3 - 0.0053x^2 + 1.8183x + 1.6088$$

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de γ :

$$\int_{-1.30}^{43.02} 3 \cdot 10^{-12}x^6 - 3 \cdot 10^{-9}x^5 + 1 \cdot 10^{-6}x^4 - 0.0001x^3 - 0.0053x^2 + 1.8183x + 1.6088 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 1552.474 cd

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{43.02} 1.4282x \, dx = 1321.5744 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 230.8997 cd

5.3.1.1.3 PLANO C = 112.5°

```
x=[-1.4 -1.39 -1.28 -1.16 -1.03 -0.82 -0.61 -0.49 -0.38 -0.35 -0.32 -
0.29 -0.25 -0.21 -0.17 -0.13 -0.09 -0.03 0 0.12 1.01 4.32 10.36 18.51
30.05 49.44 68.71 86.62 94.15 104.69 129.73 170.30 225.15 277.61 312.68
335.72 318.1];
y=[0 0.12 0.23 0.31 0.38 0.38 0.35 0.34 0.32 0.35 0.38 0.41 0.43 0.45
0.47 0.48 0.49 0.4 0.7 1.39 5.71 16.13 28.47 39.7 52.05 70.61 81.89
86.62 79 73.3 74.9 79.41 81.95 74.38 55.13 29.37 0];
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:')
p=polyfit(x,y,6)
xp=-2:5:320;
```

```
yp=polyval(p,xp);
plot(x,y,'ro')
hold on
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)
```

```
a=[-2 0 49.44 70];
b=[-2.856 0 70.61 99.973];
plot(a,b,'r','linewidth',1)
```

El polinomio aproximado a los puntos es:

p =

```
6.636e-12    -5.7599e-9    1.6324e-6    -131.402e-6    -12.6725e-3
2.2307    1.9963
```

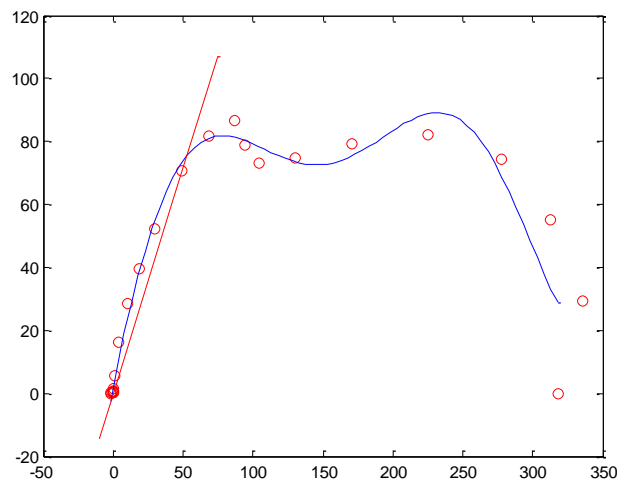


Figura 5. 3 Ajuste polinómico del plano C = 105°

Fuente: Simulación en Matlab

Expresamos la ecuación de la forma:

$$6.636 \cdot 10^{-12}x^6 - 5.7599 \cdot 10^{-9}x^5 + 1.6324 \cdot 10^{-6}x^4 - 131.402 \cdot 10^{-6}x^3 - 12.6725 \cdot 10^{-3}x^2 + 2.2307x + 1.9963$$

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de γ :

$$\int_{-1.4}^{49.44} 6.636 \cdot 10^{-12}x^6 - 5.7599 \cdot 10^{-9}x^5 + 1.6324 \cdot 10^{-6}x^4 - 131.402 \cdot 10^{-6}x^3 - 12.6725 \cdot 10^{-3}x^2 + 2.2307x + 1.9963 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 2201.9144 cd

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{49.44} 1.4282x \, dx = 1745.4792 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 456.4352 cd

Por lo tanto, la intensidad luminosa total emitida por una luminaria hacia las fachadas de las viviendas es de 1242.2243 cd

5.3.1.2 LUMINARIA ONYX 2

Los planos C a analizar serán los correspondientes a los ángulos de 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 110° y 120°; los mismo cuyos valores de intensidad luminosa se encuentran en las tablas del Anexo 3.1. Como tenemos valores en coordenadas polares, iniciamos realizando una conversión a coordenadas rectangulares para posteriormente desarrollar el ajuste polinómico y así obtener las ecuaciones respectivas de cada plano:

5.3.1.2.1 PLANO C = 60°

Realizamos la programación de datos en Matlab, mediante el siguiente código:

```
x=[-176.8 -173 -166.6 -130.1 -123.3 -142.1 -130.7 -116.6 -101.6 -87.2 -  
72.6 -58.6 -48.7 -40.9 -35.7 -29.1 -19.2 -15.2 0 41.4 251.1 955.4 1952.7  
3537.6 4532.9 5294.8 5928.1 6543.5 7295.5 7887.9 8653.2 9844.5 10657.1  
11114.4 11174.2 10758.3 10605.3];  
y=[0 15.1 29.4 34.9 44.9 66.3 75.5 81.6 85.2 87.2 86.5 83.7 84.4 87.6  
98 108.8 108.8 173.7 364.6 473.3 1424 3565.5 5365.1 7586.4 7851.2 7561.8  
7064.8 6543.5 6121.7 5523.1 4995.9 4590.6 3878.9 2978.1 1970.3 941.2 0];  
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:\n')  
p=polyfit(x,y,6)  
xp=-200:5:11000;  
yp=polyval(p,xp);  
plot(x,y,'ro')  
hold on  
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)  
  
a=[-300 0 5294.8 6000];  
b=[-428.446 0 7561.8 8568.94];  
plot(a,b,'r','linewidth',1)
```

El cual nos dará como resultado los coeficientes del polinomio que se ajusta a la curva de distribución lumínica en ese plano.

El polinomio aproximado a los puntos es:

$$p = 107 \cdot 10^{-12} x^4 - 577.9945 \cdot 10^{-9} x^3 + 903.409 \cdot 10^{-6} x^2 + 2.5781x + 331.2553$$

Pudiendo expresar la ecuación de la forma:

$$107 \cdot 10^{-12} x^4 - 577.9945 \cdot 10^{-9} x^3 + 903.409 \cdot 10^{-6} x^2 + 2.5781x + 331.2553$$

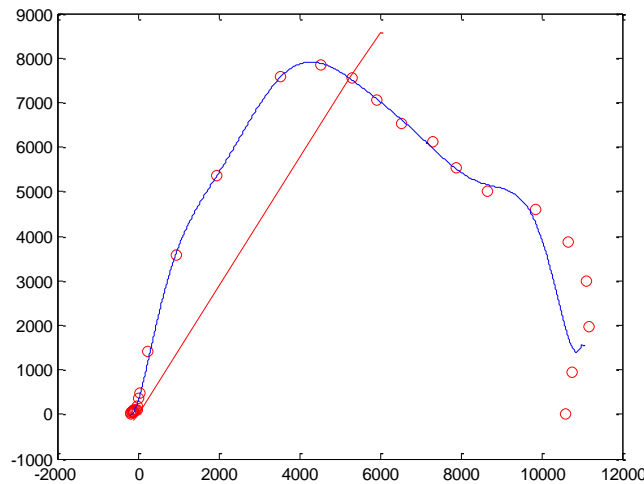


Figura 5. 4 Ajuste polinómico del plano C = 60°

Fuente: Simulación en Matlab

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de γ :

$$\int_{-176.8}^{5294.8} 107 \cdot 10^{-12} x^4 - 577.9945 \cdot 10^{-9} x^3 + 903.409 \cdot 10^{-6} x^2 + 2.5781x + 331.2553 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 58098959.8925 cd

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{5294.8} 1.4282x \, dx = 20019104.64 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 38.07985 cd

De igual manera procedemos a realizar para el resto de planos obteniendo:

5.3.1.2.2 PLANO C = 70°

$x = [-202.7 \ -195.4 \ -188.7 \ -181.1 \ -172.9 \ -160.9 \ -146.2 \ -129.5 \ -112.4 \ -95.7 \ -79 \ -62.6 \ -49.7 \ -41.5 \ -36.6 \ -30.7 \ -20.7 \ -12.3 \ 0 \ 43.7 \ 327.7 \ 1287.7 \ 3180]$

```

6005.7 7775.7 8891.6 8986.6 9366.8 9907.3 10358.3 11520 13406.5 14555.7
15044.1 15026.7 14798.8 14334.3];
y=[0 17.1 33.3 48.5 62.9 75 84.4 90.7 94.3 95.7 94.1 89.4 86.1 88.9
100.5 114.8 117.3 140.7 366 499.8 1858.2 4805.9 8737.1 12879.2 13469.6
12698.5 10709.8 9366.8 8313.2 7253 6651.1 6251.5 5297.9 4031.1 2649.6
1294.7 0];
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:\n')
p=polyfit(x,y,10)
xp=-210:5:15000;
yp=polyval(p,xp);
plot(x,y,'ro')
hold on
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)

a=[-300 0 8891.6 10000];
b=[-428.4437 0 12698.5 14281.4567];
plot(a,b,'r','linewidth',1)

```

El polinomio aproximado a los puntos es:

```

p =
-5e-20    2e-15    3e-11    2e-7   -0.0005    3.4052   470.7

```

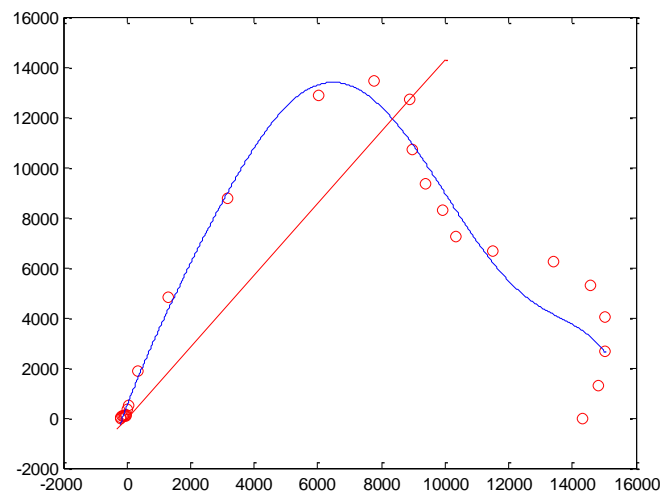


Figura 5. 5 Ajuste polinómico del plano C = 70°

Fuente: Simulación en Matlab

Expresamos la ecuación de la forma:

$$-5 \cdot 10^{-20}x^6 + 2 \cdot 10^{-15}x^5 - 3 \cdot 10^{-11}x^4 + 2 \cdot 10^{-7}x^3 - 0.0005x^2 + 3.4052x + 470.7$$

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de y :

$$\int_{-202.7}^{8891.6} -5 \cdot 10^{-20}x^6 + 2 \cdot 10^{-15}x^5 - 3 \cdot 10^{-11}x^4 + 2 \cdot 10^{-7}x^3 - 0.0005x^2 + 3.4052x + 470.7 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 134057224.441 *cd*

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{8891.6} 1.4281x \, dx = 56454991.3169 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 77.6022 *cd*

5.3.1.2.3 PLANO C = 80°

```
x=[-220.3 -214 -204.7 -196.1 -187.6 -174.6 -159.1 -141.4 -122.7 -104 -  
85.2 -66.5 -51.8 -43.5 -39 -32.7 -21.1 -10.9 0 44.7 389.4 1525.6 4190.8  
8148.6 11018.3 12686.4 12434.6 12954.3 13598.6 14105.8 15546.3 18339.7  
20396.8 21270.9 21029.9 20595.4 19797.8];  
y=[0 18.7 36.1 52.5 68.3 81.4 91.9 99 103 104 101.6 95 89.7 93.3 107  
122.1 119.7 124.5 359.1 511.1 2208.1 5693.6 11514.1 17474.8 19084.2 18118  
14819 12954.3 11410.6 9877 8975.7 8551.9 7423.8 5699.5 3708.1 1801.9 0];  
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:\n')  
p=polyfit(x,y,6)  
xp=-250:5:21000;  
yp=polyval(p,xp);  
plot(x,y,'ro')  
hold on  
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)  
  
a=[-300 0 12686.4 13000];  
b=[-428.443 0 18118 18565.866];  
plot(a,b,'r','linewidth',1)
```

El polinomio aproximado a los puntos es:

```
p =  
-8e-21    5e-16   -1e-11    8e-8   -0.0004    3.4151    507.28
```

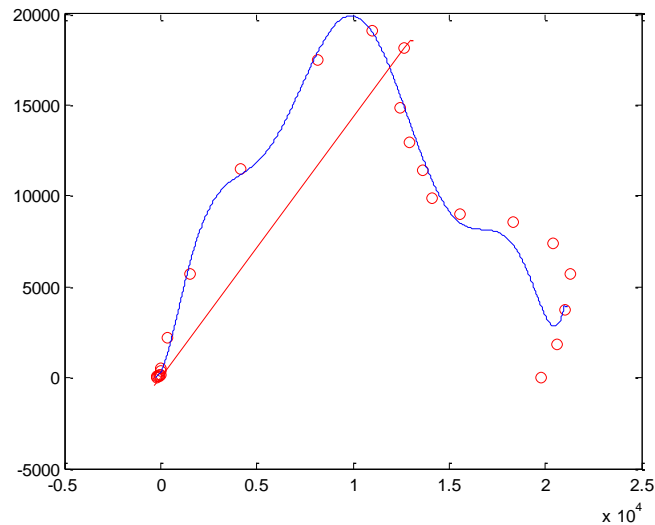


Figura 5. 6 Ajuste polinómico del plano $C = 80^\circ$

Fuente: Simulación en Matlab

Expresamos la ecuación de la forma:

$$-8 \cdot 10^{-21}x^6 + 5 \cdot 10^{-16}x^5 - 1 \cdot 10^{-11}x^4 + 8 \cdot 10^{-8}x^3 + 0.0004x^2 + 3.4151x + 507.28$$

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de y :

$$\int_{-220.3}^{12686.4} -8 \cdot 10^{-21}x^6 + 5 \cdot 10^{-16}x^5 - 1 \cdot 10^{-11}x^4 + 8 \cdot 10^{-8}x^3 + 0.0004x^2 + 3.4151x + 507.28 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 156840560.442 cd

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{12686.4} 1.4281x \, dx = 114926097.618 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 41.9145 cd

5.3.1.2.4 PLANO $C = 90^\circ$

```
x=[-233.4 -223.5 -214.9 -205.5 -195.9 -182.1 -166.3 -148.8 -129.1 -109.9
-90.6 -71.7 -56 -47.3 -41.6 -34.3 -21.3 -13.5 0 44.7 407 1603.5 4668.1
9390.7 13120 15096.9 15026.8 15633.9 16535 16746.3 17760.2 20329.8
22807.4 23935.1 23481.5 23112.5 22411.5];
y=[0 19.6 37.9 55.1 71.3 84.9 96 104.2 108.3 109.9 107.9 102.4 96.9
101.4 114.2 128.1 121 154.1 333.5 511.1 2308.1 5984.4 12825.4 20138.3
22724.4 21560.7 17908.3 15633.9 13874.5 11725.9 10253.9 9480 8301.2
6413.4 4140.4 2022.1 0];
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:\n')
```

```
p=polyfit(x,y,9)
xp=-250:5:24000;
yp=polyval(p,xp);
plot(x,y,'ro')
hold on
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)

a=[-300 0 15096.9 16000];
b=[-428.446 0 21560.7 22850.466];
plot(a,b,'r','linewidth',1)
```

El polinomio aproximado a los puntos es:

p =
 29.3e-12 -440.2242e-9 1.2266e-3 2.5746 402.7931

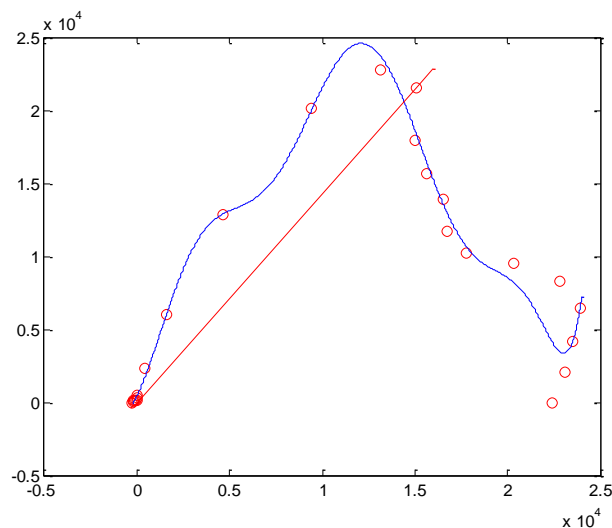


Figura 5. 7 Ajuste polinómico del plano C = 90°

Fuente: Simulación en Matlab

Expresamos la ecuación de la forma:

$$29.3 \cdot 10^{-12}x^4 - 440.2242 \cdot 10^{-9}x^3 + 1.2266 \cdot 10^{-3}x^2 + 2.5746x + 402.7931$$

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de γ :

$$\int_{-233.4}^{15096.9} 29.3 \cdot 10^{-12}x^4 - 440.2242 \cdot 10^{-9}x^3 + 1.2266 \cdot 10^{-3}x^2 + 2.5746x + 402.7931 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 584929297.883 cd

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{15096.9} 1.4281x \, dx = 162749865.874 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 422.1794 cd

5.3.1.2.5 PLANO C = 100°

```
x=[-232.7 -225.6 -218.3 -209.4 -199.2 -185.2 -168.4 -152.2 -132.2 -112.8
-93.2 -74 -59.1 -50.2 -43.7 -35.2 -21.3 -14.3 0 43.3 372 1501.8 4426.7
9277.4 13405.2 15883.1 16135.6 15915.2 17028.6 17098.7 17120.3 18578.8
20607.6 21836.6 21320.3 20866.5 20579.5];
y=[0 19.7 38.5 56.1 72.5 86.4 97.3 106.6 110.9 112.8 11.1 105.8 102.3
107.7 120.1 131.4 121 163.1 323.2 495.3 2109.6 5604.9 12162.3 19895.5
23218.4 22683.5 19229.7 15915.2 14288.7 11972.7 9884.4 8663.4 7500.6
5850.1 3759.3 1825.6 0];
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:\n')
p=polyfit(x,y,6)
xp=-250:5:22000;
yp=polyval(p,xp);
plot(x,y,'ro')
hold on
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)

a=[-300 0 15883.1 16000];
b=[-428.446 0 22683.5 22850.4511];
plot(a,b,'r','linewidth',1)
```

El polinomio aproximado a los puntos es:
p =

9e-13 4e-8 5e-4 3.9769 585.58

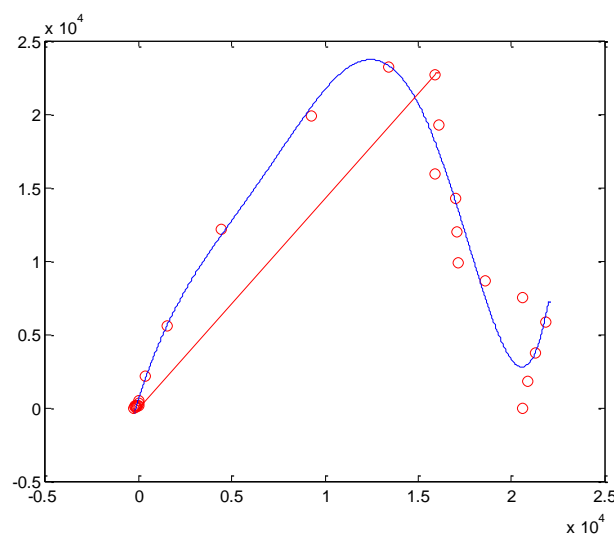


Figura 5. 8 Ajuste polinómico del plano C = 100°

Fuente: Simulación en Matlab

Expresamos la ecuación de la forma:

$$9 \cdot 10^{-13}x^4 + 4 \cdot 10^{-8}x^3 + 5 \cdot 10^{-4}x^2 + 3.9769x + 585.58$$

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de γ :

$$\int_{-232.7}^{15883.1} 9 \cdot 10^{-13}x^4 + 4 \cdot 10^{-8}x^3 + 5 \cdot 10^{-4}x^2 + 3.9769x + 585.58 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 661511387.08 *cd*

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{15883.1} 1.4281x \, dx = 180142149.39 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 481.3692 *cd*

5.3.1.2.6 PLANO C = 110°

```
x=[-215.4 -211.9 -204.7 -199.5 -191.4 -179 -164.5 -148.2 -129.6 -109.9  
-91 -73.3 -60.4 -52.2 -45.1 -35 -21.3 -14.7 0 41.7 305 1289 3721.2 8032.2  
12200.2 14460.4 15133.8 13853.1 14458.8 14360.4 13974.7 14012 14850  
15846.9 15756 15397.6 15459.1];  
y=[0 18.5 36.1 53.4 69.7 83.5 95 103.8 108.8 109.9 108.5 104.7 104.6 112  
123.9 130.8 121 167.9 312.8 476.7 1730 4810.5 10224 17225.1 21131.3  
20651.6 18035.8 13853.1 12132.4 10055.3 8068.3 6533.9 5404.9 4246.2  
2778.2 1347.1 0];  
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:\n')  
p=polyfit(x,y,6)  
xp=-250:5:17000;  
yp=polyval(p,xp);  
plot(x,y,'ro')  
hold on  
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)  
  
a=[-300 0 14460.4 15000];  
b=[-428.446 0 20651.6 21422.229];  
plot(a,b,'r','linewidth',1)
```

El polinomio aproximado a los puntos es:

```
p =  
1.9e-12      28.6226e-9      -394.0813e-6      3.5912      527.6426
```

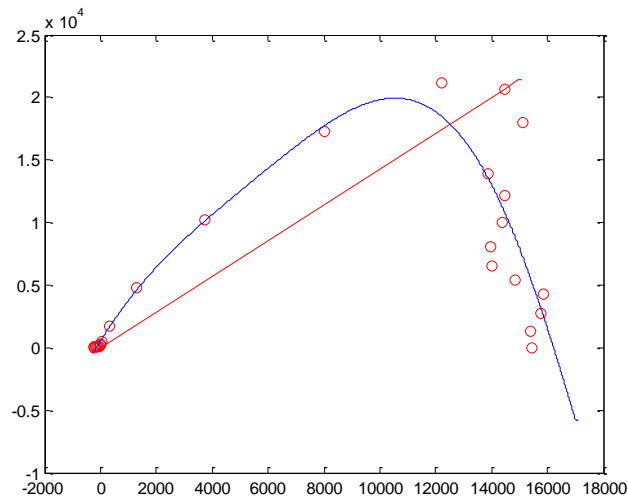



Figura 5. 9 Ajuste polinómico del plano C = 110°

Fuente: Simulación en Matlab

Expresamos la ecuación de la forma:

$$1.9 \cdot 10^{-12}x^4 + 28.6226 \cdot 10^{-9}x^3 - 394.0813 \cdot 10^{-6}x^2 + 3.5912x + 527.6426$$

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de γ :

$$\int_{-215.4}^{14460.4} 1.9 \cdot 10^{-12}x^4 + 28.6226 \cdot 10^{-9}x^3 - 394.0813 \cdot 10^{-6}x^2 + 3.5912x + 527.6426 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 539064643.926 cd

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{14460.4} 1.4281x \, dx = 149315198.327 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 389.7494 cd

5.3.1.2.7 PLANO C = 120°

```
x=[-187.1 -184.4 -180.2 -174.1 -167.5 -159 -148.4 -132.9 -118.5 -102.5
-86.6 -72.5 -61.8 -54.3 -46.5 -34.7 -23 -16 0 39.2 233.2 968.7 2490
5512.2 8860 10109.1 10800.2 9896.1 9593.2 9327.7 9384.2 9328.2 9424.6
9828.4 10036.9 10040.7 10227.6];
y=[0 16.1 31.8 46.6 60.9 74.1 85.7 93.1 99.4 102.5 103.2 103.5 107 116.4
127.8 129.4 130.6 183 337.7 447.8 1322.7 3615.2 6841.3 11820.9 15346
14437.3 12871.2 9896.1 8049.6 6531.3 5418 4349.8 3430.3 2633.5 1769.8
878.5 0];
fprintf('El polinomio aproximado a los puntos es:\n')
p=polyfit(x,y,6)
```

```

xp=-250:5:11000;
yp=polyval(p,xp);
plot(x,y,'ro')
hold on
plot(xp,yp,'b','linewidth',1)

a=[-250 0 10109.1 11000];
b=[-357.037 0 14437.3 15709.6379];
plot(a,b,'r','linewidth',1)

```

El polinomio aproximado a los puntos es:

p =
2e-18 -6e-14 6e-10 -2e-6 0.0033 2.3187 301.29

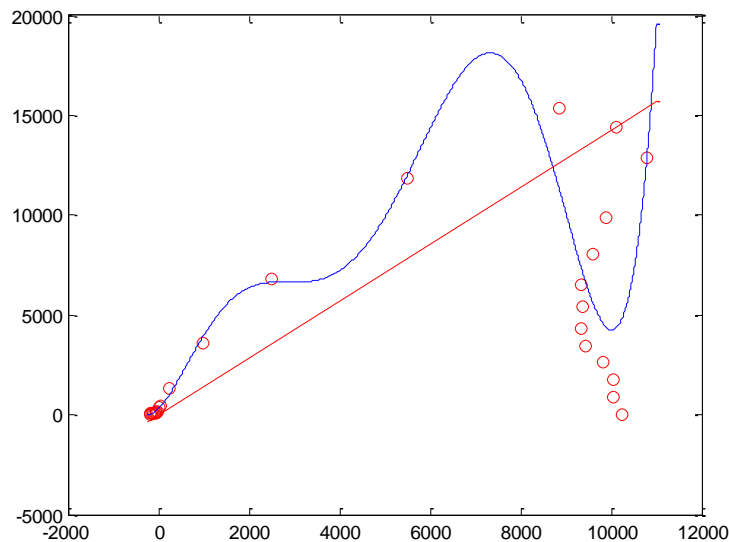


Figura 5. 10 Ajuste polinómico del plano C = 120°

Fuente: Simulación en Matlab

Expresamos la ecuación de la forma:

$$2 \cdot 10^{-18}x^6 - 6 \cdot 10^{-14}x^5 + 6 \cdot 10^{-10}x^4 - 2 \cdot 10^{-6}x^3 + 0.0033x^2 + 2.3187x + 301.29$$

La ecuación obtenida, es integrada para los límites de γ :

$$\int_{-187.1}^{10109.1} 2 \cdot 10^{-18}x^6 - 6 \cdot 10^{-14}x^5 + 6 \cdot 10^{-10}x^4 - 2 \cdot 10^{-6}x^3 + 0.0033x^2 + 2.3187x + 301.29 \, dx$$

Obteniendo una intensidad luminosa de: 1115088055.02 cd

A este valor restamos el que se encuentra bajo la recta del ángulo de 55°

$$\int_0^{10109.1} 1.4281x \, dx = 72974054.738 \, cd$$

Obteniendo una intensidad luminosa total de: 1042.114 *cd*

Por lo tanto, la intensidad luminosa total emitida por una luminaria hacia las fachadas de las viviendas es de 2493.0087 *cd*

5.4 CÁLCULO DE FLUJO LUMINOSO

El flujo luminoso empleado por cada luminaria sería:

5.4.1 LUMINARIA INTI (General Public Lighting) 250W

Intensidad luminosa: 1242.2243 *cd*

Como el estereorradián es el equivalente tridimensional del radián y está demostrado que en una esfera completa se tienen 4π sr, los intervalos angulares antes analizados nos demuestran que:

$$\omega = \frac{25\pi}{27} \text{ sr}$$

Calculamos el flujo luminoso mediante la fórmula:

$$\phi = I \cdot \omega$$

$$\phi = 1242.2243 \cdot \frac{25\pi}{27}$$

$$\phi = 3613.4840 \text{ lm}$$

5.4.2 LUMINARIA ONYX 2

Intensidad luminosa: 2493.0087 *cd*

$$\phi = I \cdot \omega$$

$$\phi = 2493.0087 \cdot \frac{25\pi}{27}$$

$$\phi = 7251.8682 \text{ lm}$$

5.5 CÁLCULO DE CANTIDAD DE LUZ

5.5.1 LUMINARIA INTI (General Public Lighting) 250W

$$\phi = 3613.4840 \text{ lm}$$

$$Q = \phi \times t$$

$$Q = 3613.4840 \times 12$$

$$Q = 43361.8082 \text{ lmh}$$

5.5.2 LUMINARIA ONYX 2

$$Q = 7251.8682 \times 12$$

$$Q = 87022.419 \text{ lmh}$$

5.6 TABLA DE RESULTADOS

En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en el cálculo de magnitudes luminosas que afectan las fachadas de las viviendas adyacentes al alumbrado público existente en el Centro Histórico de la ciudad de Cuenca.

Tabla 5. 1 Resultados obtenidos.

	Magnitud Luminosa	Valor por Luminaria	N° de luminarias	Total
INTI (General Public Lighting) 250W	Intensidad Luminosa	1242.22 cd	302	375151.74 cd
	Flujo Luminoso	3613.48 lm		1091272.17 lm
	Cantidad de Luz	43361.81 lmh		13095266.02 lmh
ONYX 2	Intensidad Luminosa	2493.01 cd	950	2368358.26 cd
	Flujo Luminoso	7251.87 lm		6889274.84 lm
	Cantidad de Luz	87022.42 lmh		82671298.07 lmh

Fuente: Autor

5.7 CÁLCULO DE EMISIÓN DE CO₂.

Según el informe 2013 del “Factor de Emisión de CO₂ del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador” el factor de emisiones por MWh es de 0.5062 tCO₂/MWh, entonces tenemos que:

Para la lámpara INTI (General Public Lighting) de 250W, el flujo luminoso total emitido por la luminaria es de 30236.48 lm; por lo tanto, por regla de tres simple se puede decir que la potencia que está siendo utilizada por la luminaria para iluminar las fachadas de las viviendas de manera innecesaria es de:

$$\frac{3613.48 \times 250}{30236.48} = 29.8768 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta el número de luminarias que se tienen y si estás funcionan por un intervalo de 12 horas al día, tenemos:

$$29.8768 \times 12 \times 302 = 0.10827 \text{ MWh}$$

Por lo tanto:

$$0.10827 \times 0.5062 = 0.0548 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

De igual forma tenemos para la luminaria ONYX 2:

$$\frac{7251.8682 \times 250}{38982.6} = 46.50708 \text{ W}$$

$$46.50708 \times 12 \times 950 = 0.53018 \text{ MWh}$$

$$0.53018 \times 0.5062 = 0.26837 \text{ tCO}_2/\text{KWh}$$

Lo que nos da un total de: 0.32317 tCO₂/KWh

En la Tabla 5.2 se presenta las emisiones de CO₂ mensuales y anuales producidas por el alumbrado público existente en el Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca.



Tabla 5. 2 Resultados obtenidos de las Emisiones de CO2.

Emisiones de CO2 <i>tCO2/KWh</i>	Emisiones de CO2 mensuales <i>tCO2/KWh mes</i>	Emisiones de CO2 anuales <i>tCO2/KWh años</i>
0.32	9.69	117.96

Fuente: Autor

CAPÍTULO 6

6. PROPUESTA DE SOLUCIONES A PROBLEMAS DE POLUCIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se mencionan algunas propuestas de posibles soluciones al problema de la polución lumínica analizado, basadas en el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP 2010. Posteriormente se plantea la correcta orientación de las luminarias y finalmente una breve descripción de los sistemas de iluminación Led como posible solución al problema de polución lumínica.

6.2 CÓMO MINIMIZAR EL IMPACTO DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

“Utilizar luminarias o soportes de luminarias que controlen el flujo luminoso enviado por encima de la horizontal, de tal manera que el conjunto óptico no quede con un ángulo de inclinación mayor de 20° con respecto a la horizontal” [8].

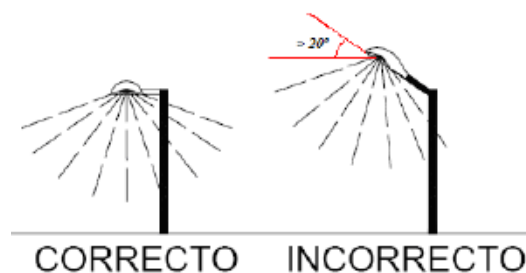


Figura 6. 1 Ángulos de inclinación de las luminarias.

Fuente: Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público RETILAP 2010.

- Se debe seleccionar brazos que coloquen a la luminaria en forma horizontal.

“El conjunto óptico de las luminarias de alumbrado público no podrán tener un ángulo de inclinación mayor de 20° con respecto a la horizontal. Por ello antes de determinar la inclinación del soporte de la luminaria se debe conocer la

inclinación del conjunto óptico, cuando la luminaria se encuentra en posición horizontal” [8].

- Como el ángulo de inclinación de las luminarias existentes en el Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca es de 15° , este ángulo podría ser reducido a 0° con respecto a la horizontal, evitando así una mayor afección a las viviendas adyacentes.

“Utilizar luminarias y proyectores que dirijan el flujo lumínico hacia el área a iluminar y para ello la distribución de su flujo luminoso deberá ser la adecuada para obtener la máxima eficiencia energética de la instalación” [8].

- Se debe cuidar el posicionamiento y el apuntamiento u orientación de los aparatos de iluminación. Colocar el ángulo de enfoque de forma que la luz solo se dirija a la zona a iluminar. Si la altura de ubicación de la luminaria aumenta modificar adecuadamente el ángulo de enfoque.
- Utilizar lámparas de espectro poco contaminante y gran eficiencia energética, como por ejemplo las de sodio a baja presión.

6.3 ORIENTACIÓN CORRECTA DE LAS LUMINARIAS

En la Figura 6.3 podemos ver la correcta orientación de una luminaria, en donde el foco se encuentra orientado por encima de la horizontal y es apantallado evitando de esta manera iluminar las fachadas de las viviendas adyacentes de forma innecesaria al igual que emitir luz hacia el cielo.



Figura 6. 2 Correcta orientación de la luminaria.

Fuente: <http://images.search.yahoo.com>

6.4 SISTEMA DE ILUMINACIÓN LED

En los sistemas de iluminación a base de luminarias Led, la luz de estas luminarias es direccional, lo que permite que menos flujo lumínico sea utilizado para iluminar espacios de manera innecesaria, evitando el exceso de iluminación en el cielo y logrando un ahorro energético sin perder cantidad y calidad de la luz.

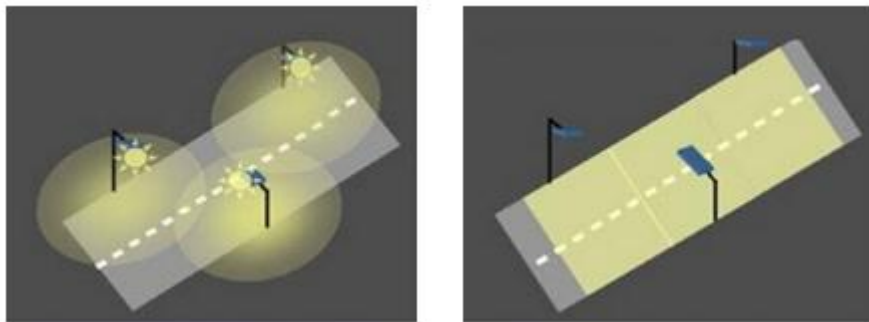


Figura 6. 3 Diseño tradicional de alumbrado publico (i), vs Diseño optimizado (d).

Fuente: Optics Express

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- En el Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca existen 1252 luminarias de sodio a alta presión distribuidas en 147 manzanas, de las cuales 302 son el modelo INTI (General Public Lighting) y 950 del modelo ONYX ambas de 250 W de potencia y disposición unilateral instaladas a 8.5 m de altura con una inclinación de 15°.
- Las curvas de distribución luminosa dan la información de lo que ocurre en los planos para algunos de los valores de C, para la luminaria modelo INTI (General Public Lighting) al tener menos número de planos los cálculos realizados tienen mayor margen de error a comparación de la luminaria ONYX en donde hemos analizado los planos de 60° a 120° en un intervalo de 10°. Para las luminarias los valores de C comprendidos entre los ángulos de 0° y 180° caen sobre la calzada mientras que los valores comprendidos entre los ángulos de 180° y 360° caen sobre la acera por lo que no fueron considerados en el análisis.
- De los cálculos realizados se puede apreciar que del flujo luminoso total de las luminarias, un 11.95% de las luminarias INTI (General Public Lighting) y un 18.6% de las luminarias ONYX dan hacia las fachadas de las viviendas adyacentes del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca produciendo polución lumínica.
- La energía consumida atribuible a la contaminación lumínica estimada corresponde a 2.29 kWh/mes por cada luminaria.
- Las emisiones de CO₂ producidas por el efecto de la polución lumínica originada es de 9.69 tCO₂/KWh mes y de 117.96 tCO₂/KWh año de todas las luminarias existentes en el Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca.
- Para reducir la polución lumínica e iluminar las fachadas de las viviendas de manera innecesaria se debe dar una correcta orientación a las luminarias, esto se podría lograr, disminuyendo el ángulo de inclinación

de la luminaria sobre la horizontal lo que ayudará a dirigir hacia abajo el haz de los rayos y permitirá que menos flujo lumínico sea utilizado para iluminar espacios de manera innecesaria, evitando el exceso de iluminación en el cielo y logrando un ahorro energético sin perder la cantidad y calidad de la luz.

7.2 RECOMENDACIONES

- Para cálculos futuros es recomendable contar con un mayor número de planos que formen el sólido de distribución lumínica para así reducir el porcentaje de error y por ende tener una mejor aproximación del flujo luminoso que se encuentra afectando a las viviendas adyacentes del Centro Histórico de la Ciudad de Cuenca.
- La metodología propuesta podría ser mejorada paulatinamente a lo largo de las experiencias obteniendo una mejor aproximación a los datos fotométricos de las luminarias.
- Seguir trabajando sobre el tema de polución lumínica, para ir adquiriendo mayor conocimiento sobre el efecto que esta produce.
- Para reducir las áreas afectadas por el flujo luminoso se podría disminuir el ángulo de inclinación de la luminaria hasta la horizontal.
- Realizar un estudio de la factibilidad de trabajar con nueva tecnología de iluminación, tecnología LED, que a más de brindar ventajas de eficiencia energética permite iluminar solamente las áreas deseadas, reduciendo de esta manera la polución lumínica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. V. G. L. J. L. E. A. G. S. P. G. Raúl M. Quito A., «Metodología para evaluar la polución lumínica causada por el alumbrado público en la ciudad de Cuenca.,» *MASKADA*, vol. 5, nº 1, 2014.
- [2] E. Colombo y B. O'Donnell, *Manual de Iluminación Eficiente*, 2002.
- [3] H. D. Pozo, *REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO RTE INEN 069 "ALUMBRADO PÚBLICO"*, Quito, 2013.
- [4] EERSSA, *Norma Técnica para el Diseños de Redes Eléctricas Urbanas y Rurales*, 2012.
- [5] N. I. C. 598-1, *Norma UNE-EN 60588-1*.
- [6] J. A. Taboada, *Manual de Luminotecnia*, España: Dossat S.A., 1983.
- [7] ICONTEC, «NORMA TÉCNICA COLOMBIANA» de REGLAS GENERALES Y ESPECIFICACIONES PARA EL ALUMBRADO PUBLICO, Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2006.
- [8] E. d. B. S. E.S.P., *Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Publico 'RETILAP'*, Bogotá: RETILAP, 2010.
- [9] «Wikipedia,» [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Contaminación_lumínica. [Último acceso: 28 Junio 2017].
- [10] D. e. C. Oscuro, «Año Internacional de la Astronomía 2009,» Proyecto Pilas AIA-IYA, 2009. [En línea]. Available: http://www.astronomia2009.es/Proyectos_pilares/Descubre_el_Cielo_Oscuro/Definicion_y_Origen_de_la_Contaminacion_Luminica.html. [Último acceso: 28 Junio 2017].
- [11] A. P. Rosales, «Sociedad Astronómica Granadina,» Febrero 2002. [En línea]. Available: http://www.astrogranada.org/cieloscurio/htm/que_es_cl.htm. [Último acceso: 28 Junio 2017].
- [12] L. O. A. y. G. S. Dutt, «Efficient Lighting,» 2000. [En línea]. Available: <http://www.efficientlighting.net/formerdoc/pubdoc/ELI136.pdf>. [Último acceso: 28 Junio 2017].
- [13] [En línea]. Available: <http://www.miprv.com/causas-y-consecuencias-de-la-contaminacion-luminica/>. [Último acceso: 28 Junio 2017].
- [14] OLAM, «Contaminación Lumínica,» 1999.
- [15] J. A. H. Ortiz, «Ahorro de energía y Reducción de la Contaminación Lumínica,» México D.F., 2010.
- [16] C. H. Dorremochea, «Impacto ambiental de la Iluminación nocturna artificial,» 2002.
- [17] T. L. y. E. Zeiger, «Fisiología Vegetal,» Book Print Difital S.A., Castelló de la Planta, 2006.



- [18] ECOLIGHT, «El tratamiento de la Contaminación Lumínica en el Parque Natural de L'Albufera de Valencia,» Valencia, 2002.
- [19] C. I. D. I. CIE 121-1996, «FOTOMETRÍA Y GONIOFOTOMETRÍA DE LUMINARIAS,» Madrid, ESPAÑA.
- [20] C. I. D. I. CIE 140-2000, «ROAD LIGHTING CALCULATIONS,» Vienna, AUSTRIA, 2006.
- [21] L. L. Chabla Auqui y D. F. Córdova Erráez, «EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL ALUMBRADO PÚBLICO DEL CENTRO HISTÓRICO DE CUENCA: TELEGESTIÓN Y SUSTITUCIÓN DE LUMINARIAS.,» Cuenca, 2015.
- [22] G. P. I. G, «Informe Anual Alumbrado Público 2015,» CENTROSUR, Cuenca, 2015.
- [23] G. P. LIGHTING, «Catálogo INTI,» Guayaquil.
- [24] C. I. d. Iluminación.

ANEXOS

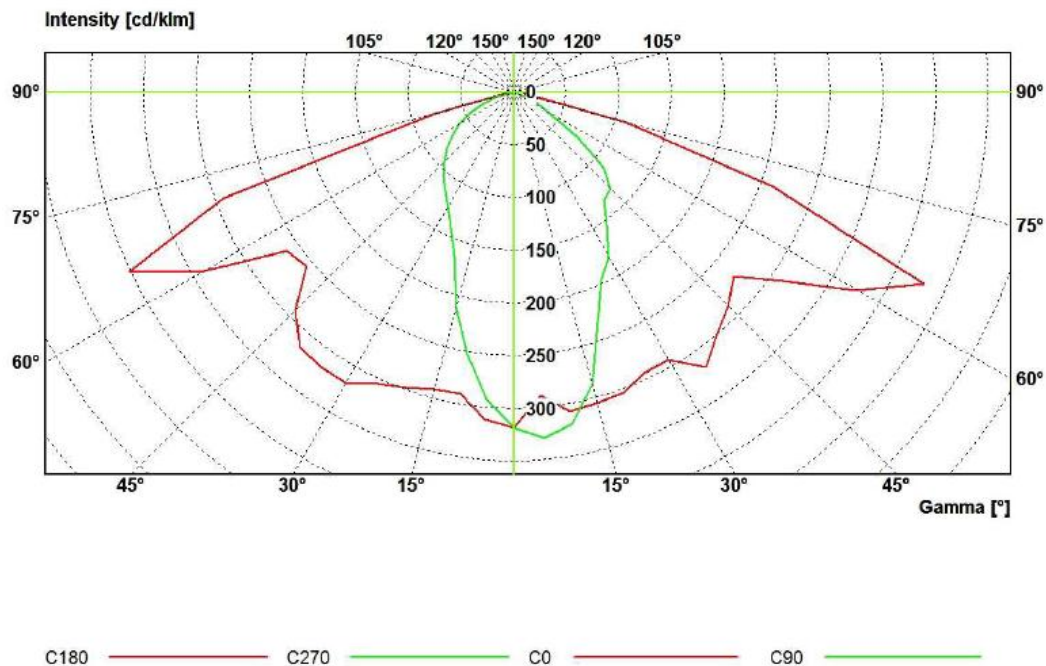
ANEXO 3.1. Reportes fotométrico

INTI 250 W

CATALOG NUMBER:	Street Light		
MANUFACTORY:	GENERAL PUBLIC LIGHTING S.A.		
LUMINAIRE:	INTI 250W		
LAMPS:	OSRAM NAV-T 250W SUPER 4Y		
BALLAST:	NaMH 250		
TEST DISTANCE:	30.18m	GONIOMETER:	TYPE C
VOLTAGE/Frequency:	240.0 V~ / 60 Hz	CURRENT:	1.2383 A
INPUT POWER:	284.50W	POWER FACTOR:	0.9575

ZONAL LUMEN SUMMARY		
ZONE (Gamma)	Zonal flux	%LUM
0-90°	23196.17lm	99.25%
90-180°	174.19lm	0.75%
0-180°	23370.36lm	100.0%
Lamp flux	30236.48lm	
LOR	77.29%	

Luminous intensity distribution diagram



CANDELA DISTRIBUTION [cd/klm]

G/C	0.00	22.50	45.00	67.50	90.00	112.50	135.00	157.50	180.00
0.00	318.1	318.1	318.1	318.1	318.1	318.1	318.1	318.1	318.1
5.00	288.4	295.7	305.3	317.5	328.7	337.0	327.1	317.5	310.9
10.00	306.6	308.2	295.3	300.3	318.8	317.5	308.9	303.6	290.4
15.00	304.3	324.4	307.6	269.5	286.4	287.4	292.4	305.9	291.4
20.00	302.9	306.9	288.4	239.2	231.8	239.6	276.8	306.3	297.7
25.00	293.4	291.0	245.2	215.2	196.6	187.9	231.0	289.1	304.3
30.00	292.7	263.9	204.1	196.8	180.6	149.8	184.0	275.8	318.2
35.00	317.5	270.2	163.3	172.2	153.1	127.8	150.2	250.0	317.8
40.00	299.0	234.6	130.0	161.6	132.5	122.9	128.9	248.6	315.2
45.00	287.4	201.1	122.2	162.7	129.2	122.5	122.8	207.0	292.0
50.00	271.9	173.7	106.6	147.9	112.0	106.9	107.1	182.6	255.9
55.00	310.9	152.9	93.6	108.2	75.0	86.2	101.3	171.2	261.6
60.00	374.1	134.7	80.3	68.1	41.9	60.1	84.3	178.6	338.3
65.00	428.0	106.7	69.1	44.3	24.7	43.8	67.8	138.1	401.8
70.00	261.3	82.3	56.0	30.3	13.1	30.3	48.8	75.1	293.0
75.00	110.5	37.0	35.3	18.2	7.0	16.7	32.9	27.4	78.9
80.00	19.2	6.7	3.9	5.9	3.6	5.8	4.1	6.8	15.8
85.00	13.6	4.3	2.2	1.5	1.2	1.4	2.5	4.4	9.5
90.00	9.2	2.5	1.1	0.7	0.5	0.7	1.3	2.9	7.0
95.00	4.7	1.6	0.8	0.5	0.4	0.4	0.8	1.5	3.6
100.00	1.3	1.2	0.8	0.5	0.4	0.5	0.7	1.2	1.3
105.00	1.3	1.2	0.8	0.5	0.4	0.5	0.7	1.2	1.3
110.00	1.3	1.2	0.8	0.5	0.5	0.5	0.8	1.2	1.3
115.00	1.2	1.2	0.8	0.6	0.5	0.5	0.8	1.2	1.2
120.00	1.2	1.2	0.8	0.6	0.5	0.5	0.8	1.2	1.2
125.00	1.3	1.2	0.8	0.6	0.5	0.5	0.8	1.2	1.3
130.00	1.2	1.1	0.7	0.5	0.5	0.5	0.7	1.1	1.2
135.00	1.1	0.9	0.6	0.5	0.4	0.5	0.6	1.0	1.0
140.00	0.9	0.8	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	0.9
145.00	0.8	0.8	0.7	0.6	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8
150.00	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9
155.00	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
160.00	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
165.00	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
170.00	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
175.00	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4
180.00	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4

ONYX 2

Luminaire Property

Luminaire Manufacturer:

Luminaire Category: Alumbrado Público

Lamp Description: EVERLUX 250W HPS 250

Lumens per Lamp: 33200

Current: 1.316 A

Power Factor: 0.959

Luminaire Description: 250W NA HP

Number of Lamps: 1

Voltage: 220.1 V

Power: 280 W

Photometric Results

IES Classification: Type III

Total Rated Lamp Lumens: 33200.0 lm

Efficiency: 117.42%

Upward Ratio: 2.48%

Central Intensity: 57.62 cd

Pos of Max. Intensity: H100 V55

Longitudinal Classification: Very Short

Measurement Flux: 38982.6 lm

Downward Ratio: 114.94%

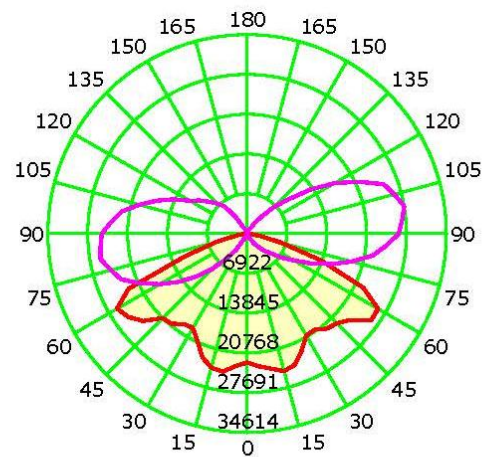
Luminaire Efficacy Rating (LER): 139

Max. Intensity: 27691.39 cd

Picture Of Luminaire



Luminous Intensity Distribution Curve



Average Diffuse Angle(50%): 186.4° Unit: cd

— C0-C180 — C90-C270 — G55

Candlepower Table

Unit: cd

G\C	C0.0	C10.0	C20.0	C30.0	C40.0	C50.0	C60.0	C70.0	C80.0	C90.0
G0.0	57.6	230.8	1658.5	3673.5	6323.6	8944.8	10605.3	14334.3	19797.8	22411.5
G5.0	59.3	240.0	1860.5	3829.6	6394.4	9033.8	10799.4	14855.3	20674.1	23200.8
G10.0	62.8	255.0	1929.8	3944.9	6358.9	9165.5	11346.6	15258.5	21354.3	23843.7
G15.0	68.0	273.6	2011.2	4018.8	6164.5	9041.6	11506.5	15574.8	22021.3	24779.4
G20.0	73.4	288.2	2207.8	4159.6	5930.9	8546.0	11341.1	15489.9	21705.8	24271.1
G25.0	79.4	283.8	2302.3	4355.4	5936.2	8066.9	10862.2	14792.4	20235.6	22431.5
G30.0	85.7	273.8	2078.4	4503.9	5993.7	7890.1	9991.8	13302.2	17951.3	20507.7
G35.0	93.5	267.5	1542.1	4538.9	5998.9	7795.9	9629.3	12645.2	17220.0	20443.5
G40.0	102.1	261.3	900.5	4084.7	5842.3	7538.6	9523.6	12933.1	17751.7	21584.9
G45.0	109.9	254.3	589.6	3073.8	5335.5	7091.0	9253.9	13246.7	18320.1	22109.7
G50.0	116.2	244.6	540.4	2180.9	4220.1	6468.6	9222.5	13980.7	19344.8	23377.6
G55.0	124.4	237.9	508.4	1063.3	3164.1	5355.0	9231.2	15502.0	22118.0	26320.7
G60.0	137.7	235.5	469.8	975.4	2164.5	4925.8	9065.8	15553.4	22036.5	26239.9
G65.0	157.7	236.9	443.6	896.7	1781.4	3887.8	8370.7	14210.6	19281.3	22220.2
G70.0	188.2	259.6	419.2	802.8	1679.9	3224.1	5709.4	9297.8	12253.0	13648.5
G75.0	232.6	296.9	394.3	692.1	1301.3	2415.0	3691.3	4975.4	5894.5	6195.5
G80.0	284.2	335.2	393.7	471.0	664.0	1084.7	1446.0	1886.9	2242.2	2343.7
G85.0	316.4	352.7	379.5	410.2	435.9	453.3	475.1	501.7	513.1	513.1
G90.0	265.2	296.3	320.6	338.9	353.0	362.0	364.6	366.0	359.1	333.5
G95.0	185.9	169.5	191.6	186.1	186.8	187.5	174.4	141.2	125.0	154.7
G100.0	166.3	110.4	98.2	94.4	100.8	103.1	110.5	119.1	121.5	122.9
G105.0	213.6	114.8	86.1	87.5	96.5	105.7	112.6	118.8	126.4	132.6
G110.0	202.1	122.9	92.7	90.5	98.4	102.9	104.3	107.0	113.9	121.5
G115.0	173.0	114.9	85.5	93.7	98.9	98.6	96.7	98.1	102.9	111.9
G120.0	148.5	103.8	81.3	92.7	96.2	96.7	97.4	99.4	103.6	111.9
G125.0	129.8	90.0	78.3	87.9	93.2	96.8	102.2	109.1	116.0	125.0
G130.0	114.4	73.7	74.6	84.3	92.2	100.1	112.9	122.9	132.6	140.9
G135.0	102.9	58.4	70.5	82.2	93.2	108.4	123.3	135.4	147.1	155.4
G140.0	90.8	56.1	66.9	80.8	96.3	115.7	132.6	146.7	160.2	168.5
G145.0	78.9	53.4	64.1	79.9	100.1	121.5	142.3	158.1	172.6	181.6
G150.0	65.9	51.2	62.1	79.9	102.4	126.9	150.9	168.8	183.7	192.0
G155.0	52.9	49.2	60.9	79.9	104.1	130.5	156.8	177.5	192.7	200.9
G160.0	42.6	48.1	60.5	79.1	105.1	133.4	161.2	184.0	199.6	208.5
G165.0	36.5	47.8	61.0	80.1	106.9	137.1	164.7	187.5	203.0	212.7
G170.0	32.9	47.5	61.7	81.1	108.8	140.2	169.2	191.6	207.9	218.2
G175.0	31.7	47.3	62.3	82.2	110.5	143.8	173.7	196.1	214.8	224.4
G180.0	31.5	46.8	62.4	82.0	111.0	145.4	176.8	202.7	220.3	233.4

Candlepower Table (Continue 1)

Unit: cd

G\c	C100.0	C110.0	C120.0	C130.0	C140.0	C150.0	C160.0	C170.0	C180.0	C190.0
G0.0	20579.5	15459.1	10227.6	7661.5	6109.2	4016.2	1461.9	164.4	57.6	230.8
G5.0	20946.2	15456.4	10079.1	7531.0	5942.8	3942.3	1341.0	168.5	58.0	232.5
G10.0	21649.2	15999.1	10191.7	7472.3	5933.8	4048.6	1531.6	168.5	60.2	242.2
G15.0	22606.9	16405.9	10175.1	7380.5	5815.0	4119.8	1889.3	168.5	63.2	252.6
G20.0	21930.2	15803.0	10029.4	7259.7	5746.7	4161.9	2088.9	172.6	66.9	254.7
G25.0	20499.4	15460.5	10292.5	7067.0	5718.4	3933.3	1895.5	178.9	72.0	251.9
G30.0	19768.8	16136.6	10853.9	7098.8	5576.1	3820.8	1481.2	188.5	77.2	243.1
G35.0	20873.7	17530.8	11387.0	7439.9	5615.5	3494.8	1211.2	195.4	82.7	235.6
G40.0	22229.2	18874.6	12523.0	7818.3	5384.1	2780.8	611.8	201.6	87.8	226.8
G45.0	22507.5	19591.3	13995.2	8356.9	4625.2	2284.3	504.1	209.2	93.9	213.8
G50.0	25102.6	23544.0	16802.2	8687.0	3856.0	1426.7	475.8	217.5	100.0	196.5
G55.0	27691.4	25211.0	17624.7	9260.2	3940.2	973.0	469.6	227.9	108.9	185.8
G60.0	26810.3	24400.3	17720.0	9460.4	3046.7	1006.1	492.4	238.9	122.8	185.1
G65.0	21952.3	19005.8	13042.9	7201.6	2746.3	1174.6	513.8	250.7	141.1	194.8
G70.0	12942.8	10880.2	7280.4	4463.0	2419.7	1171.2	497.2	262.4	169.2	217.0
G75.0	5802.6	4980.2	3742.7	2595.1	1524.7	770.6	399.1	296.2	216.9	260.1
G80.0	2142.1	1756.7	1343.1	971.6	644.3	443.3	370.8	342.5	276.2	311.1
G85.0	497.2	478.5	449.5	421.9	404.7	386.7	374.3	360.5	302.7	333.7
G90.0	323.2	312.8	337.7	343.9	347.3	348.0	350.1	349.4	241.0	264.9
G95.0	163.7	168.5	183.7	203.7	229.3	254.8	279.0	303.1	160.7	148.9
G100.0	122.9	122.9	132.6	138.1	145.0	155.4	194.0	239.6	169.7	103.2
G105.0	136.0	135.4	134.0	126.4	117.4	126.4	138.1	175.4	197.8	107.2
G110.0	127.8	131.9	136.0	134.0	126.4	110.5	113.9	132.6	175.1	111.2
G115.0	118.8	123.6	128.4	130.5	126.4	113.3	94.6	107.7	151.7	104.6
G120.0	118.1	120.8	123.6	125.0	121.5	110.5	90.5	89.1	131.8	92.1
G125.0	129.1	127.8	126.4	122.9	116.7	105.7	87.0	73.2	114.5	80.1
G130.0	145.0	141.6	134.7	123.6	113.9	100.8	81.5	60.1	102.9	62.1
G135.0	159.5	155.4	145.0	128.4	112.6	96.0	75.3	50.4	90.4	57.9
G140.0	172.6	169.2	154.7	134.7	112.6	90.5	69.7	46.3	78.6	54.8
G145.0	185.8	180.9	162.3	138.8	112.6	87.0	64.2	42.8	65.6	51.7
G150.0	195.4	189.9	171.3	142.3	111.9	84.3	60.1	40.0	52.3	49.7
G155.0	204.4	197.5	175.4	143.6	109.8	80.8	56.6	38.0	42.3	48.3
G160.0	212.0	203.7	178.2	143.6	107.7	78.0	53.9	36.6	36.8	47.5
G165.0	216.8	206.5	180.2	142.9	105.7	75.3	52.5	35.2	33.8	47.0
G170.0	221.7	207.9	183.0	144.3	104.3	73.9	51.8	34.5	32.3	46.8
G175.0	226.5	212.7	185.1	145.7	105.0	73.2	51.8	33.8	31.4	46.4
G180.0	232.7	215.4	187.1	145.7	105.7	73.9	51.8	33.8	31.6	46.8